

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



*Одеська державна академія
технічного регулювання та якості*

ISSN 2412 – 5288 (Print)
ISSN 2414 – 9780 (Online)

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

2(13) 2018

ОДЕСА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ
Випуск 2(13) 2018

Заснований у 2012 р.

Засновник: Одеська державна академія технічного регулювання та якості
65020, м. Одеса, вул. Ковальська (Кузнечна), 15
Телефон: (048)726-68-92, факс: (048)726-76-95
E-mail: odatry@gmail.com
Сайти: <https://osatrq.edu.ua>, www.kachestvo.od.ua, odatrya.org.ua.

Редакційна колегія

Голова редакційної колегії

Коломієць Леонід Володимирович (д.т.н., професор)

Заступник голови редакційної колегії

Братченко Геннадій Дмитрович (д.т.н., професор)

Аніскін Олексій (к.т.н., доцент, Республіка Хорватія)

Боряк Костянтин Федорович (д.т.н., доцент)

Ваганов Олександр Іванович (д.т.н., професор)

Величко Олег Миколайович (д.т.н., професор)

Волков Сергій Леонідович (к.т.н., доцент)

Гасанов Юсиф Надир огли (д.т.н., професор, Азербайджанська Республіка)

Гордієнко Тетяна Богданівна (д.т.н., с.н.с., доцент)

Грабовський Олег Вікторович (к.т.н., доцент)

Діденко Віктор Дмитрович (д.ф.-м.н., професор)

Зборовська Ірина Адамівна (к.т.н., доцент)

Квасніков Володимир Павлович (д.т.н., професор)

Клещов Геннадій Михайлович (к.т.н., доцент)

Корсун Валерій Іванович (д.т.н., професор)

Кучерук Володимир Юрійович (д.т.н., професор)

Лещенко Олег Іванович (к.т.н., доцент)

Ленков Сергій Васильович (д.т.н., професор)

Мілковіч Марін (к.т.н., професор, Республіка Хорватія)

Мілованов Валерій Іванович (д.т.н., професор)

Меленчук Тетяна Михайлівна (д.т.н.)

Новіков Володимир Миколайович (д.ф.-м.н., професор)

Салсеану Александру (д.т.н., професор, Румунія)

Семенова Алла Василівна (д.пед.н., професор)

Скачков Валерій Вікторович (д.т.н., професор)

Солдо Божо (д.т.н., професор, Республіка Хорватія)

Чундева-Блаєр Марія (д.т.н., професор, Республіка Македонія)

Янковський Олег Георгійович (к.т.н., доцент)

Відповідальний секретар Братченко Геннадій Дмитрович

Внесений наказом Міністерства освіти і науки України від 15.04.2014 р. № 455 до «Переліку наукових фахових видань України» за № 37 (технічні науки).

Затверджений до друку і розповсюдження через мережу Інтернет Вченою Радою Одеської державної академії технічного регулювання та якості (протокол № 5 від 06.12.2018 р.).

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 18770-7570Р від 30.01.2012 р.

© Одеська державна академія технічного регулювання та якості

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ZBÌRNIK NAUKOVIIH PRAC' ODES'KOÏ DERŽAVNOÏ AKADEMII
TEHNIČNOGO REGULŪVANNÂ TA ÂKOSTI (COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS OF THE ODESA STATE ACADEMY OF TECHNICAL REGULATION
AND QUALITY)

Issue 2(13) 2018

Established in 2012

Founder is Odesa state academy of technical regulation and quality

15 Kovalska street, Odesa, 65020, Ukraine

Phone: (048) 726-68-92, fax: (048) 726-76-95

E-mail: odatry@gmail.com

Websites: www.kachestvo.od.ua (<https://osatrq.edu.ua>), odatrya.org.ua.

Editorial board

Editor-in-Chief

Kolomiets Leonid (DSc, Professor, Ukraine)

Deputy Editor

Bratchenko Hennadii (DSc, Professor, Ukraine)

Aniskin Aleksej (PhD, Docent, Republic of Croatia)

Boriak Kostiantyn (DSc, Docent, Ukraine)

Vahanov Oleksandr (DSc, Professor, Ukraine)

Velychko Oleh (DSc, Professor, Ukraine)

Volkov Serhii (PhD, Docent, Ukraine)

Hasanov Yusif Nadir Ogly (DSc, Professor, Azerbaijan Republic)

Gordiyenko Tetyana (DSc, Docent, Ukraine)

Hrabovskyi Oleh (PhD, Docent, Ukraine)

Didenko Viktor (DSc, Professor, Ukraine)

Zborovska Iryna (PhD, Docent, Ukraine)

Kvasnikov Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Kleshchov Hennadii (PhD, Docent, Ukraine)

Korsun Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Kucheruk Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Leshchenko Oleh (PhD, Docent, Ukraine)

Lienkov Serhii (DSc, Professor, Ukraine)

Milković Marin (PhD, Professor, Republic of Croatia)

Milovanov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Melenchuk Tetiana (DSc, Ukraine)

Novikov Volodymyr Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)

Salceanu Alexandru (DSc, Professor, Romania)

Semenova Alla (DSc, Professor, Ukraine)

Skachkov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)

Soldo Božo (DSc, Professor, Republic of Croatia)

Cundeva-Blajer Marija (DSc, Professor, Republic of Macedonia)

Yankovskyi Oleh (PhD, Docent, Ukraine)

Secretary Bratchenko Hennadii

Included by the Ministry of Education and Science of Ukraine order dated April 15, 2014 No. 455 to the "List of scientific professional editions of Ukraine" under No. 37 (technical sciences).

Approved for printing and distribution through the Internet by the Academic Council of the Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality (protocol No. 5 dated December 06, 2018).

Свідоцтво про державну реєстрацію KB № 18770-7570P від 30.01.2012 р.

© Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality

ЗМІСТ

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості	5
С. Л. Волков, к.т.н., Н. Ф. Казакова, д.т.н., Ю. В. Щербина, к.т.н. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ КІБЕРНЕТИЧНОГО ПРОСТОРУ	6
Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення	13
V. F. Orobey, DSc, A. F. Dashchenko, DSc, L. V. Kolomiets, DSc, A. M. Limarenko, PhD STABILITY OF COMPRESSED RODS WITH VARIABLE RIGIDITY	14
Н. М. Арцибашева, к.т.н., Т. М. Меленчук, д.т.н., О. В. Ковра, Б. Ч. Бердієв ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕТЕРОГЕННОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ НА РЕСУРС ТРИМАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИЧЕПА.....	21
В. А. Мащенко, к.ф.-м.н., В. П. Квасніков, д.т.н. АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ПРОХОДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ЗАНУРЕНУ У РІДИНУ ПЛАСТИНУ	27
Л. В. Коломієць, д.т.н., О. М. Лимаренко, к.т.н. КОМП'ЮТЕРНИЙ ТА НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ ПРИЧАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА.....	32
Інформаційно-вимірювальні системи і технології	42
С. Л. Волков, к.т.н., С. Д. Асабашвілі, С. В. Коломієць МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ПРОМИСЛОВИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ	43
С. Л. Волков, к.т.н., Є. В. Вавілов, к.т.н. ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННА МОДЕЛЬ ЯКІСНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	50
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	57
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	58

РОЗДІЛ 1

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості

УДК 519.217.2+338+331

С. Л. Волков, к.т.н., Н. Ф. Казакова, д.т.н., Ю. В. Щербина, к.т.н.

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ КІБЕРНЕТИЧНОГО ПРОСТОРУ

У статті розглянуто проблеми сучасного стану кібернетичного простору. Проаналізовано проблеми, що виникають при використанні відкритого Internet-середовища зловмисниками та можливі шляхи удосконалення методології побудови систем кібернетичного захисту. Розглянуто структуру стандарту ISO/IEC 27032:2012 і визначення у ньому кібернетичного простору та основних суміжних із ним понять. Зроблено висновок про необхідність пошуку нової, більш досконалої моделі захисту та методології оцінки інформаційної безпеки а також способів побудови адекватних загрозам систем захисту.

Ключові слова: стандарти інформаційної безпеки, нормативно-правові документи, політика безпеки, управління ризиками, інформаційна безпека, інформаційний захист, кібернетична безпека, кіберпростір, кібернетична зброя, кіберзлочинність, Internet-простір, автоматизація управління, управління безпекою, стейкхолдер.

S. L. Volkov, PhD, N. F. Kazakova, DSc, Yu. V. Shcherbina, PhD

CURRENT PROBLEMS OF THE CYBERNETIC SPACE SECURITY

The article deals with the problems of information security in modern cyberspace. The problems arising from the use of an open Internet environment by hackers are analyzed, taking into account the introduction of such modern intelligent technologies as “embedded systems”, “smart cities”, “big data”, expert systems and decision-making support systems, as well as intelligent infrastructure management systems. The evolution of the international regulatory framework defining information security principles is considered. Prerequisites for the emergence and implementation of information concepts such as cyberspace and cybersecurity, as well as related concepts, have been analyzed and described in terms of information security. An analysis of the structure of the ISO / IEC 27032: 2012 standard is given, in which the formal definition of the new terminology is presented and the main subjects of information relations responsible for security are identified. Based on the analysis, it was shown that the reasons for the complexity of creating modern information protection systems are the increasing complexity of software and hardware of modern telecommunications systems and a significant expansion of the range of information services provided to users in the Internet environment. It is noted that the emergence of intelligent automation technology requires finding a new set of protection functions and means to ensure its security. The problems in the existing national regulatory framework governing the issues of information security are identified, and the conclusion is drawn on the need to improve it. It justifies the need to search for a new, more advanced protection model and methodology for assessing threats and information security, as well as tools for building protection systems that are adequate to modern threats.

Keywords: information security standards, regulatory documents, security policy, risk management, information security, information protection, cyber security, cyberspace, cyberweapon, cybercrime, Internet space, management automation, security management, stakeholder.

С. Л. Волков, к.т.н., Н. Ф. Казакова, д.т.н., Ю. В. Щербина, к.т.н.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В статье рассмотрены проблемы текущего состояния кибернетического пространства. Проанализированы проблемы, возникающие при использовании открытого Internet-пространства злоумышленниками и возможные пути совершенствования методологии построения систем киберзащиты. Рассмотрена структура стандарта ISO/IEC 27032:2012 и определения в нем кибернетического пространства, а также, основных смежных понятий. В результате получены выводы о необ-

ходимости совершенствования модели защиты и методологии оценки защищенности, а также способов построения адекватных угрозам систем защиты.

Ключевые слова: стандарты информационной безопасности, нормативно-правовые документы, политика безопасности, управление рисками, информационная безопасность, информационная защита, кибернетическая безопасность, киберпространство, кибернетическое оружие, киберпреступность, Internet-пространство, автоматизация управления, управление безопасностью, стейкхолдер.

DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-6-12

Вступ

Інформатизація усіх сфер життєдіяльності суспільства приводить до суттєвого розширення середовища експлуатації систем автоматизованого управління інформаційними і технологічними процесами. Удосконалення інформаційних технологій, що забезпечують створення нових видів послуг у Internet-середовищі, разом із позитивними сторонами, має і негативні наслідки.

Перша проблема полягає у підвищенні структурної складності програмного та апаратного забезпечення інформаційно-телекомунікаційних систем, що приводить до зниження їх надійності. Об'єднання у загальну систему великої кількості високонадійних компонентів не робить автоматично усю систему також високонадійною. Зазвичай загальна надійність навпаки, знижується. Це особливо небезпечно для систем технологічного управління енергопостачанням, транспортом та подібними великими системами. Зазвичай ціна помилки у таких системах надзвичайно велика.

Зростання масштабів об'єктів управління викликає зростання складності алгоритмів управління, що, у свою чергу, приводить до надмірного навантаження на персонал, який бере участь в управлінні. Одним із варіантів вирішення зазначених питань, на думку експертів може стати подальше впровадження інтелектуальних систем автоматизованого управління [1]. Тобто перекладання більшої кількості управлінських рішень на обчислювальну техніку.

Наступна проблема полягає у розширенні можливостей скоєння злочинів в інформаційному середовищі. Розширення спектру послуг, що надають користувачам сучасні інформаційно-телекомунікаційні системи, приводить до появи нових уразливостей у системах захисту, на основі яких будуються нові сценарії комп'ютерних атак, а це, у свою чергу, спрощує організацію і здійснення злочинів у державній, виробничій та соціальній сферах із використанням можливостей Інтернет-середовища.

З метою адекватного реагування на підвищення ризиків у більшості країн світу приймається велика кількість відповідних законів і пі-

дзаконних актів, пов'язаних з організацією боротьби із протиправними діями у сфері державної безпеки та соціального життя. Однак, вони більшою мірою призначені для регулювання соціальних відносин між суб'єктами інформаційних процесів, що протікають у сучасному Internet-середовищі і не торкаються технічної сторони проблеми.

Нові виклики у сфері інформаційної безпеки випливають із того, що глобалізація суспільного життя, виробництва і бізнесу створює нові напрями діяльності як у легальній, так і кримінальній сферах. Наприклад, наприкінці нульових років хакерство перейшло на комерційну основу, так само як торгівля зброєю або наркотиками. І кіберпростір тільки полегшує діяльність у таких протиправних сферах.

Таким чином, нові проблеми сучасного Інтернет-середовища пов'язані не стільки із уразливістю автоматизованих систем, скільки намаганням використати сучасні інформаційно-телекомунікаційні системи та їх нові можливості для досягнення зловмисних цілей. Все це привело до того, що у міжнародних нормативних документах поряд з поняттями інформаційна безпека та інформаційний простір набули поширення такі терміни як кібербезпека та кіберпростір. Це, у свою чергу, вимагає розуміння суті цих понять і відповідної адаптації національної законодавчої та нормативної бази до сучасних вимог захисту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поява перших цивільних автоматизованих інформаційних систем у середині 70-х років минулого сторіччя одразу привела до публічної дискусії про забезпечення недоторканності інформаційних ресурсів, що зберігаються, обробляються і передаються у таких системах. Результатом дискусії став документ під назвою «Критерії оцінки захищених комп'ютерних систем» [2], опублікований у 1985 році міністерством оборони США. В ньому були викладені основні засади створення захищених систем, визначена відповідна термінологія і, головне, надана шкала для оцінки рівня захищеності комп'ютерних систем. Цей документ був розрахований на закриті сис-

теми, що не мають фізичного виходу у зовнішній інформаційний простір.

На початку 90-х років з'явилися доступні персональні комп'ютери з уніфікованою операційною системою і це привело до появи відкритого мережного простору. Організація на основі колективної відкритої обчислювальної мережі розподіленого обчислювального процесу, у свою чергу, викликала розширення кола інформаційних послуг, що надаються користувачам. Проблеми захисту таких мереж вирішувались на основі національного законодавства окремих країн. Спочатку у країнах Заходу таких як США, Канада та Європейських країнах з'явилися відповідні національні документи, що визначали критерії оцінки захисту інформаційних технологій [3-5]. Наприкінці 1999 року у світ вийшли «Загальні критерії», зараз відомі та прийняті в Україні як ДСТУ ISO/IEC 15408:2017 [6]. Ці, та інші, пов'язані із ними, документи, визначали термінологію та основні засади захисту інформації у відкритому мережному просторі. Їх метою стало регулювання правових відносин між замовниками і розробниками захищених інформаційних технологій. Вони були націлені на вирішення технічних питань захисту. Тобто, крім термінології вони визначали які функції захисту і від яких загроз мають використовуватись, як має бути побудований профіль захисту і як забезпечити необхідний рівень довіри до системи захисту.

Щодо питань організації захисту і управління ним, то вони вперше були викладені у стандарті BS 7799, виданому Британським інститутом стандартів (British Standards Institution – BSI) під назвою «Практичні правила управління інформаційною безпекою» у 1995 році. У 2000 році ISO/IEC JTC 1/SC 27, на базі британського стандарту BS 7799, розробив міжнародний стандарт з менеджменту безпеки ISO/IEC 17799. Згодом, у різні роки виходили міжнародні стандарти серії ISO/IEC 27000, що визначають модель управління безпекою, яка включає функції управління безпекою. По відношенню до них експерти різних країн досягли згоди на основі накопиченого досвіду. Сукупність цих стандартів визначають вимоги до систем управління інформаційною безпекою, управління ризиками, метрики та вимірювання, а також керівництво по втіленню.

Сьогодні інформаційне Інтернет-середовище надає користувачам надзвичайно широкий спектр послуг, починаючи із забезпечення документообігу і до автоматизації управління складними, розподіленими у просторі технічними системами.

Зважаючи на великі якісні зміни, що відбу-

лися у загальному інформаційному просторі і нові проблеми у питаннях захисту, ISO/IEC оприлюднило новий міжнародний стандарт ISO/IEC 27032:2012 «Інформаційні технології. Методи забезпечення безпеки. Настанови із кібербезпеки» [7]. Цим стандартом було визначено такі поняття як кіберпростір та кібербезпека і надано їх тлумачення.

Підставами до введення нової термінології стало інтенсивне впровадження сучасних обчислювальних та телекомунікаційних технологій у сферу виробництва та соціального і суспільного життя людей. Мініатюризація обчислювальних пристроїв та збільшення їх обчислювальних можливостей дозволили підняти на якісно новий рівень автоматизацію управління складними виробничими процесами. Тобто це наслідки технічного прогресу у галузі інформаційно-телекомунікаційних систем.

Ще однією причиною суттєвих змін в інформаційному просторі є активне впровадження інтелектуальних технологій управління із використанням систем штучного інтелекту у всі сфери життєдіяльності, особливо для оптимізації функціонування інфраструктури складних систем. До складу таких систем слід віднести технології роботи із «великими даними», експертні системи, системи підтримки прийняття рішень і, так звані, «вбудовані системи» [8]. Під вбудованими розуміються системи управління, які розміщуються безпосередньо у виконавчих пристроях, що приводить до поступового стирання межі між об'єктами і органами управління. Передбачається, що на основі таких вбудованих систем у майбутньому будуть створені «розумні будинки» і навіть «розумні міста» [9].

Сьогодні не існує загальної сталої теорії побудови таких систем. Виробники створюють їх на основі власного досвіду і це не дозволяє визначити загальні підходи до їх захисту. Цей висновок випливає із того, що «Загальні критерії» ДСТУ ISO/IEC 15408:2017 [6] орієнтовані на захист відкритих систем, побудованих на основі стеку протоколів TCP/IP. Саме вразливості цих протоколів є основою переважної більшості мережних атак на інформаційні ресурси. Стандарт ISO 27032:2012 [7], яким було визначено якісні зміни у Internet-просторі, у питаннях конкретних методик управління ризиками посилається на інші відомі стандарти серії ISO 27000, які не враховують цих змін.

Мета та основні завдання досліджень

Враховуючи вище зазначене, метою дослідження є пошук напрямів удосконалення державної нормативно-правової бази, яка могла б стати основою для створення систем захисту, що від-

повідують сучасним вимогам.

Виклад основного матеріалу

Стандарт ISO 27032:2012 [7] визначає кіберпростір як комплексне віртуальне середовище, що виникає у процесі взаємодії людей, програмного забезпечення та Internet-послуг, які підтримуються міжнародними розподіленими фізичними інформаційно-телекомунікаційними технологіями та мережами зв'язку.

Необхідність перегляду основних поглядів на захист інформаційних процесів викликана новими проблемами у Internet-просторі, які нагадують про себе дедалі частіше.

Зловмисники і злочинні організації у різних країнах світу регулярно виконують масовані атаки на державні департаменти, фінансові установи та міністерства. Ефективність реагування на такі атаки сьогодні визнається недостатньою. Саме через це у розвинених країнах Заходу захист від подібних кібернетичних атак було оголошено пріоритетним завданням.

Зважаючи на те, що кіберпростір, не дивлячись на його «віртуальність», має конкретну матеріальну основу, яка складається із апаратної частини мереж зв'язку і обчислювальних пристроїв, добре спланована атака може спровокувати економічний колапс, паралізувати оборонні структури, або значно знизити ефективність управління державними органами.

Проблемним питанням на сьогодні залишається захист від апаратних закладок на етапі виробництва і постачання апаратури. У випадках, коли йдеться про використання апаратних засобів для критично важливих інформаційних систем, таких, наприклад, як управління елементами державної інфраструктури, супроводження її розроблення, виготовлення і впровадження у робочі системи має відбуватись у режимі посиленого контролю їх якості та надійності.

Пошук ефективних шляхів вирішення проблем безпеки в усіх провідних країнах світу відбувається за підтримки та під керівництвом вищих державних інституцій. Кіберпростір розглядається як новий театр воєнних дій. Відповідно, постає питання доцільності та залежності від використання у державному секторі програмно-апаратного забезпечення виробників, афілійованих із країнами, які можуть вважатись ймовірним супротивником.

Розширенню напрямів злочинної діяльності сприяє відкритість Internet-простору. Саме намагання приєднати до Internet-мережі більшу частину обчислювальних пристроїв, задіяних в організації документообігу або у виконанні технологічних процесів просто робить їх вразливими. Має місце тенденція, коли ймовірні втрати від

реалізації загроз дедалі більше будуть перевищувати ефект від інформаційних послуг, що надає використання кіберпростору.

Є цілком очевидним, що у майбутньому проблема розподілення доступу мусить піднятися на якісно новий рівень. Великі комерційні об'єднання створюють для власних потреб закриті корпоративні приватні мережі. Постійно розвиваються технології екранування локального інформаційного середовища та VPN-технології. Але все це робиться на основі того самого стеку протоколів TCP/IP, що дає можливість при певних зусиллях долати сучасні системи захисту на програмно-апаратному рівні.

Можна стверджувати, що вже у недалекому майбутньому, для управління критично важливими автоматизованими системами, доведеться створювати локальні закриті мережі, побудовані із використанням унікальних протоколів із унеможливленням втручання із боку відкритого глобального кіберпростору. Це, насамперед, стосується управління військовим озброєнням, атомними електростанціями та іншими складними системами, де наслідки від незаконного втручання можуть бути критичними.

На основі досліджень, проведених британською компанією NCC Group за 2018 рік, було зроблено висновки про те, що у майбутньому боротьба із кіберзлочинністю буде організована на глобальному рівні, через те, що кількість атак, як із внутрішніх, так і зовнішніх джерел, буде тільки зростати. Одною із причин таких очікувань називається намагання багатьох країн в умовах економічних війн вдаватися до використання злочинних способів здобування необхідних ресурсів [12].

Стає цілком очевидним, що виникнення нових проблем у кібернетичному просторі є цілком закономірним результатом еволюційного розвитку світового інформаційного простору, рушійною силою якого є розвиток інформаційно-телекомунікаційних систем, обчислювальної техніки та інформаційних технологій. Якщо два десятиріччя тому головними проблемами були збереження конфіденційності та цілісності даних, а також забезпечення надійності функціонування інформаційних систем, то сьогодні мова іде про кібернетичну війну і кібернетичну зброю. Цілями злочинців стають повалення правлячих режимів, виведення із ладу елементів життєво важливої інфраструктури або здійснення терористичних актів. Для протидії таким негативним явищам необхідно сформулювати нові задачі захисту. Для цього шляхом відповідних досліджень слід виявити, за рахунок яких нових властивостей Internet-простору здійснюються ті або

інші злочинні дії і знайти відповідні засоби захисту для загроз кожного виду. Усе це має бути визначено на рівні державної нормативно-правової бази.

Міжнародний стандарт ISO/IEC 27032:2012 [7], визначає:

- поняття кіберпростору та кібербезпеки;
- активи кіберпростору;
- зацікавлені сторони;
- загрози;
- рекомендації щодо управління ризиками.

При цьому, пріоритетом кібербезпеки стає координація взаємодії між суб'єктами, які формують кібернетичний простір, і на них покладається відповідальність за усунення ризиків від реалізації кіберзагроз.

Модель кібернетичної безпеки, що визначає такі основні поняття як загрози, уразливості, ризики та зв'язок між ними, повністю відповідає моделі захисту, визначеній у ДСТУ ISO/IEC 15408:2017 [6], але у якості активів розглядаються в основному віртуальні гроші, аватари, хмарні технології, віртуальні розваги або інші віртуальні об'єкти, що складають предмет взаємодії між стейкхолдерами (зацікавленими особами).

Таксономія загроз у кіберпросторі надається за традиційною схемою, класифікація яких виконується за видами активів, зовнішніми або внутрішніми ознаками, цілями, порушниками, джерелами тощо. Фактично, стандарт виділяє в Internet-середовищі віртуальний сектор, що обмежується віртуальними діями над віртуальними об'єктами. Він орієнтований на керівників вищого рівня, на яких покладається відповідальність за вирішення проблем безпеки у кіберпросторі і визначає методологію управління кібербезпекою, виділяючи при цьому три напрями такого управління:

- рекомендації з оцінки і визначення ризиків;
- рекомендації вимог безпеки;
- рекомендації щодо забезпечення кібербезпеки провайдерів.

Рекомендації з оцінки і визначення ризиків викладені у відповідності до вимог ISO/IEC 27032:2012 [7], де основний наголос зроблено на відповідальності стейкхолдерів щодо звітності, інформованості і забезпечення узгодженості дій між споживачами послуг і провайдерами у разі виникнення інцидентів із питань безпеки.

Рекомендації споживачам послуг являють собою сукупність норм поведінки, визначених провайдером. Стандарт також надає керівні вказівки організаціям, що містять комплекс заходів щодо управління інформаційною безпекою. Як і в усіх суміжних стандартах засоби захисту про-

понується визначати на основі аналізу ризиків, а у якості базових заходів націлених на вирішення задач захисту запропоновано:

- захист програмних додатків;
- захист серверів;
- захист споживачів;
- захист від атак засобами соціальної інженерії;
- підвищення рівня готовності.

Що стосується інформаційного обміну, то стандарт розділяє суб'єкти інформаційного обміну на тих, що надають або отримують інформацію. Організації, що надають інформацію відіграють первинну роль і визначають її класифікацію, рівні безпеки, форми можливого обміну та інше. Сторона, що отримує інформацію, виконує захищене оброблення інформації. Для реалізації і координації обміну інформацією рекомендується:

- мати політику безпеки;
- розробити методи і процедури обміну;
- визначити перелік суб'єктів обміну;
- розробити відповідні технічні рішення.

В цілому, положення стандарту ISO/IEC 27032:2012 [7] відповідають організаційно-технічним заходам, визначеним стандартами серії 27000 і посиляються на підходи до оцінки безпеки, що викладені у стандарті [10] та «Загальних критеріях» [6].

Цього року в Україні було прийнято і опубліковано у липні місяці підготовлений за участю працівників Спеціальної служби зв'язку та захисту інформації закон «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» [11].

В основу цього закону було закладено положення і вимоги стандартів серії ISO/IEC 27000.

Однак, слід зазначити, що по-перше, не зважаючи на те, що в Україні з 2017 року вже діють стандарти пакету в [6], необхідно створити цілий пакет нормативно-методичних документів, що деталізують їх використання у сучасних умовах України.

По-друге, в Україні на офіційному рівні не діє переважна більшість документів пакету серії 27000. Стандарт 27032:2012 [7] вказує лише основні засади організації кібербезпеки і удосконалює діяльність, спрямовану на управління інформаційним захистом в Internet-просторі. Очевидно, що потребують розробки додаткові стандарти, де буде деталізовано способи вирішення складових задач кібербезпеки.

Висновки

Сучасний стан розвитку глобального інформаційного середовища, побудованого на основі інформаційно-телекомунікаційних систем, не тільки надає широкі можливості користувачам, але й приводить до негативних наслідків. В умо-

вах існування кіберпростору стають реальними деякі види злочинів, від яких людство вважало себе надійно захищеними. Боротьба із ними потребує виконання додаткових досліджень і кардинального перегляду самої концепції оцінки безпеки та правил побудови систем захисту.

Поява стандарту ISO/IEC 27032:2012 [7] фактично вводить основні поняття і визначає основні засади організації захисту у нових умовах. Що ж стосується «Загальних критеріїв» ДСТУ ISO/IEC 15408:2017 [6], що визначають технічну сторону захисту, і які у першій редакції ISO були прийняті майже двадцять років тому, то питання про їх кардинальний перегляд поки що не ставиться.

Намагання створити в Україні стратегію кібернетичної безпеки України у відповідь на нові виклики в інформаційному просторі, повинні розпочинатись із узгодження національної нормативно-правової бази з питань інформаційного захисту із вимогами відповідних міжнародних стандартів.

Список використаних джерел

1. Diagnosis and Fault Tolerant Control / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki. – Berlin: Springer-Verlag, 2003.
2. Trusted Computer System Evaluation Criteria. US Department of Defense 5200.28-STD, 1993.
3. Federal Criteria for Information Technology Security. National Institute of Standards and Technology & National Security Agency. Version 1,0 December 1992.
4. Information Technology Security Evaluation Criteria. Harmonized Criteria of France-Germany-Netherlands-United Kingdom. – Department of Trade and Industry, London, 1991.
5. Canadian Trusted Computer Product Evaluation Criteria, Version 3.0, Canadian System Security Centre, Communications Security Establishment, Government of Canada, January 1993.
6. ДСТУ ISO/IEC 15408-1:2017 Інформаційні технології. Методи захисту. Критерії оцінки. Частина 1. Вступ та загальна модель (ISO/IEC 15408-1:2009, IDT).
7. ISO/IEC 27032:2012 Information technology – Security techniques – Guidelines for Cybersecurity. – 2012-07.
8. Edward A. Lee. Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. 2015 Feb 26. [Електронний ресурс] / Портал : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> – Режим доступу <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4435108/>

9. Rodger Lea. Smart Cities: An Overview of the Technology Trends Driving Smart Cities. March 2017. – 16 С. [Електронний ресурс] / Портал : <https://www.ieee.org/> – Режим доступу <https://www.ieee.org/content/dam/ieee-org/ieee-web/pdf/ieee-smart-cities-trend-paper-2017.pdf>.

10. ДСТУ ISO/IEC 18045:2015 Інформаційні технології. Методи захисту. Методологія оцінювання безпеки IT (ISO/IEC 18045:2008, IDT).

11. Закон України Про основні засади забезпечення кібербезпеки України : Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 45, ст.403 [Електронний ресурс] / Портал : rada.gov.ua. – Режим доступу <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/287/2015>. – Заголовок з екрану, доступ вільний, 8.07.2018.

12. A Cyber Year In Review. Dec, 2018. [Електронний ресурс] / Портал : <https://www.nccgroup.trust/> – Режим доступу <https://www.nccgroup.trust/us/about-us/newsroom-and-events/blog/2018/december/a-cyber-year-in-review/?style=Cyber+Security> – Заголовок з екрану, доступ вільний, 1.12.2018.

References

1. Diagnosis and Fault Tolerant Control / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki. – Berlin: Springer-Verlag, 2003.
2. Trusted Computer System Evaluation Criteria. US Department of Defense 5200.28-STD, 1993.
3. Federal Criteria for Information Technology Security. National Institute of Standards and Technology & National Security Agency. Version 1,0 December 1992.
4. Information Technology Security Evaluation Criteria. Harmonized Criteria of France-Germany-Netherlands-United Kingdom. – Department of Trade and Industry, London, 1991.
5. Canadian Trusted Computer Product Evaluation Criteria, Version 3.0, Canadian System Security Centre, Communications Security Establishment, Government of Canada, January 1993.
6. DSTU ISO/IEC 15408-1:2017 Informatsiini tekhnolohii. Metody zakhystu. Kryterii otsinky. Chastyna 1. Vstup ta zahalna model [Information technology -- Security techniques -- Evaluation criteria for IT security -- Part 1: Introduction and general model] (ISO/IEC 15408-1:2009, IDT).
7. ISO/IEC 27032:2012 Information technology – Security techniques – Guidelines for Cybersecurity. – 2012-07.
8. Edward A. Lee. Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. 2015 Feb 26. [Electronic resource] / Portal:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> – Access mode \www/ URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4435108/>

9. Rodger Lea. Smart Cities: An Overview of the Technology Trends Driving Smart Cities. March 2017. – 16 C. [Electronic resource] / Portal : <https://www.ieee.org/> – Access mode \www/ URL: <https://www.ieee.org/content/dam/ieee-org/ieee-web/pdf/ieee-smart-cities-trend-paper-2017.pdf>

10. DSTU ISO/IEC 18045:2015 Informatsiini tekhnolohii. Metody zakhystu. Metodolohiia otsiniuvannia bezpeky IT [Information technology – Security techniques – Methodology for IT security evaluation] (ISO/IEC 18045:2008, IDT).

11. Zakon Ukrainy Pro osnovni zasady

zabezpechennia kiberbezpeky Ukrainy : Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR) [On the basic principles of ensuring cybersecurity Ukraine], 2017, № 45, стр.403 [Electronic resource] / Portal: rada.gov.ua. – Access mode \www/ URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19>, 8.07.2018.

12. A Cyber Year In Review. Dec, 2018. [Electronic resource] / Portal: <https://www.nccgroup.trust/> – Access mode \www/ URL: <https://www.nccgroup.trust/us/about-us/newsroom-and-events/blog/2018/december/a-cyber-year-in-review/?style=Cyber+Security>

Надійшла до редакції 30.11.2018

РОЗДІЛ 2

Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення

УДК 539.3

V. F. Orobey¹, DSc, A. F. Dashchenko¹, DSc, L. V. Kolomiets², DSc, A. M. Limarenko¹, PhD¹Odesa National Polytechnic University, Odesa²Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality, Odesa**STABILITY OF COMPRESSED RODS WITH VARIABLE RIGIDITY**

The problems of stability of compressed rods with continuous resizing of the cross sections in different directions are considered. Such structures include columns, chimneys, various supports, TV and radio towers, towers, parts of cranes, machines and mechanisms, various shafts and axles. It is shown that these problems are reduced to boundary problems for ordinary differential equations with variable coefficients. It is noted that analytical solutions of such equations cause the serious mathematical difficulties. For this reason, there are few cases of solving similar problems of stability of compressed rods in a closed form. In this regard, it was proposed to simplify significantly the algorithms for solving boundary problems for differential equations with variable coefficients based on the theory of a numerical-analytical version of the boundary element method that was developed in the writings of the authors of this work. For the application of technology of the boundary element method rods with variable rigidity are divided into a number of sections with constant rigidity and in such case matrices of the fundamental functions of differential equations with constant coefficients can be used. When the number of plots is more than 50, the solution of problems of stability converges to exact values. This conclusion is confirmed by the given examples of solutions of problems of stability with different boundary conditions.

Keywords: stability of rods with variable rigidity, differential equations with variable coefficients, fundamental functions, boundary problems, MATLAB environment.

В. Ф. Оробей, д.т.н., О. Ф. Дашченко, д.т.н., Л. В. Коломієць, д.т.н., О. М. Лимаренко, к.т.н.

СТІЙКІСТЬ СТИСНЕНИХ ПРУТІВ ЗІ ЗМІННОЮ ЖОРСТКІСТЮ

Розглядаються проблеми стійкості стиснутих прутів з безперервною зміною розміру поперечних перерізів в різних напрямках. Такі структури включають колони, димоходи, різні опори, телевізійні та радіо башти, вежі, частини кранів, машин та механізмів, різні вали та осі. Показано, що ці задачі зводяться до граничних задач для звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Відзначено, що аналітичні рішення таких рівнянь викликають серйозні математичні труднощі. З цієї причини є кілька випадків вирішення аналогічних проблем стабільності стиснутих прутів у замкнутій формі. У зв'язку з цим було запропоновано значно спростити алгоритми вирішення крайових задач для диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами на основі теорії чисельно-аналітичної версії методу граничних елементів, розробленої в працях авторів цієї роботи. Для застосування технології методу граничних елементів стержні зі змінною жорсткістю поділяються на ряд секцій з постійною жорсткістю, і в цьому випадку можуть бути використані матриці фундаментальних функцій диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Коли кількість ділянок більше 50, рішення завдань стабільності збігається до точних значень. Цей висновок підтверджується наданими прикладами рішень задач стабільності з різними граничними умовами.

Ключові слова: стійкість стержнів зі змінною жорсткістю, диференціальні рівняння із змінними коефіцієнтами, фундаментальні функції, крайові задачі, середовище MATLAB.

В. Ф. Оробей, д.т.н., А. Ф. Дашченко, д.т.н., Л. В. Коломієць, д.т.н., А. М. Лимаренко, к.т.н.

УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ ПРУТЬЕВ С ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

Рассмотрены проблемы устойчивости сжатых стержней с непрерывным изменением размеров сечений в разных направлениях. К таким конструкциям относятся колонны, дымоходы, различные опоры, телевизионные и радиовышки, башни, детали кранов, машин и механизмов, различные валы и оси. Показано, что эти задачи сводятся к краевым задачам для обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Отмечено, что аналитические решения таких уравнений вызывают серьезные математические трудности. По этой причине мало случаев решения по-

добных проблем устойчивости сжатых стержней в замкнутом виде. В связи с этим было предложено существенно упростить алгоритмы решения краевых задач для дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами на основе теории численно-аналитического варианта метода граничных элементов, разработанного в трудах авторов данной работы. Для применения технологии метода граничных элементов стержни с переменной жесткостью делятся на ряд секций с постоянной жесткостью, и в этом случае могут использоваться матрицы основных функций дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Когда число участков больше 50, решение проблем устойчивости сходится к точным значениям. Этот вывод подтверждается приведенными примерами решения задач устойчивости с различными граничными условиями.

Ключевые слова: устойчивость стержней с переменной жесткостью, дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами, фундаментальные функции, краевые задачи, среда MATLAB.

DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-14-20

Problem statement

The problems of stability in the Euler formulation, when the beam dimensions and the compressive

sive force change, are reduced to boundary problems for ordinary differential equations with variable coefficients [1]

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI(x) \frac{d^2 \vartheta(x)}{dx^2} \right] + \frac{d}{dx} \left[N(x) \frac{d \vartheta(x)}{dx} \right] = 0, \quad (1)$$

where $EI(x)$ is the function of flexural (minimum) rigidity, kNm^2 ;

$\vartheta(x)$ is transverse deflection, m;

$N(x)$ is the function of compressive force in beam section, kN.

The analytical solution of even such a relatively simple equation causes serious mathematical difficulties. In this case, it is necessary to apply the numerical methods, for example FEM. This raises questions about the accuracy and reliability of the results. Therefore, the problem of the development of new approaches to solving this and similar tasks remains relevant.

Analysis of researches and publications

The solution of boundary problems for differential equations with variable coefficients attracts researchers by its complexity and a wide practical application. The numerical-analytical version of boundary element method (BEM) that was developed in the works of prof. Orobey V. F. can be successfully applied to solving differential equations

with variable coefficients. [1-13]. However, in these works, rods, in which the section change was performed only in one direction, were considered. It's not exactly the general case. At the same time, in the scientific literature mathematical approaches to reflect changes in the dimensions of section in all directions (for example, a cone) are presented [14-15]. In this regard, we will present the opportunities of BEM for such cases.

The purpose of the research

The purpose of this research is numerical-analytical of BEM version to solving problems of beam stability having the shape of a truncated cone.

Presentation of basic material of the research

Since it is not possible to solve equation (1) analytically, we can propose an approximate approach that simplifies the task. It is obvious that continuous change of cross section dimensions and other rod's parameters can be approximately simulate by a stepped dependence (Fig. 1)

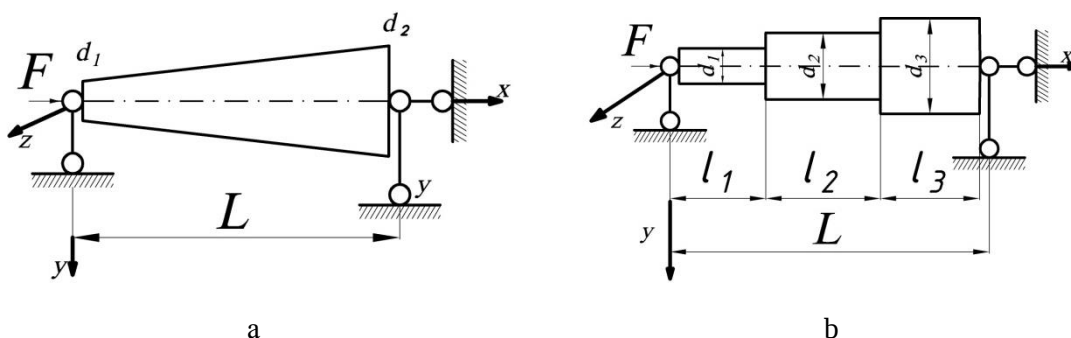


Figure 1 – Modeling of a truncated cone by a stepped system

Such a replacement is very convenient because at each beam section the change in section dimensions (and other parameters) disappears and equations with variable coefficients are automatically reduced to equations with constant coefficients, which solutions exist and they are the only ones (Cauchy problems). Remains only to use the method that will most effectively cope with the calculation

$$\mathbf{Y}(l) = \mathbf{A}(l) \cdot \mathbf{X}(0) + \mathbf{B}(l) \rightarrow \mathbf{A}(l) \cdot \mathbf{X}(0) - \mathbf{Y}(l) = -\mathbf{B}(l) \rightarrow \mathbf{A}_*(l) \cdot \mathbf{X}_*(0, l) = -\mathbf{B}(l), \quad (2)$$

where $\mathbf{Y}(l)$ is state parameter vector of all rods system in the boundary sections $x=l_i, i=1, n$;

$\mathbf{A}(l)$ is quasi-diagonal matrix of fundamental functions at $x=l_i, i=1, n$;

$\mathbf{X}(0)$ is vector of initial parameters of all rods system;

$\mathbf{B}(l)$ is external load vector at $x=l_i, i=1, n$;
 n is number of elements in the system.

As a result of parameter transfer from $\mathbf{Y}(l)$ to $\mathbf{X}(0)$ is a system of linear algebraic equations obtained. If it is required to solve eigenvalue problems, then $\mathbf{B}(l) = 0$ and at $\mathbf{X}_*(0, l) \neq 0$, the transcendental equation is obtained to search for critical forces or natural frequencies in the form of a determinant

$$\left| \mathbf{A}_*(l, F_{kp}, \omega) \right| = 0. \quad (3)$$

By setting the interval for F_{kp} or ω , you can always find your own values [1-13]. The matrix $\mathbf{A}_*(l, F_{kp}, \omega)$ has many remarkable properties:

1. Strong discharged matrix doesn't lead to a significant accumulation of rounding errors from arithmetic operations;

2. It is certainly scaled, that is, its elements smoothly decrease in size from left to right along the

task of discretized system. The methods of initial parameters, displacements, finite elements, etc. can be applied. In our opinion, the numerical-analytical version of the boundary element method [6, 9, 10, 11, 13] is most suitable here. The essence of this method comes down to elementary transformations of matrices of calculated ratios at the boundary value $x=l_i$ each system's element according to the scheme

secondary diagonal. This property causes the high stability of numerical operations when solving the system of equations (2) or when calculating the determinant;

3. When $x=0$, it forms the identity matrix;

4. In problems of stability and dynamics, it doesn't contain breaking points of the 2nd kind;

5. Is formed without matrix operations of addition, multiplication and inversion. Quasidiagonalization operation is only used.

All these advantages allow us to have the simplest algorithm for solving various boundary problems, which is characterized by high accuracy results. Let us present the BEM algorithm using the examples of the truncated cone stability problems reviewed in the works [14, 15]. The stability equation for the discretized scheme in Fig. 1, b and the i -th segment will take the form:

$$EI_i \frac{d^4 \vartheta(x)}{dx^4} + F \frac{d^2 \vartheta(x)}{dx^2} = 0. \quad (4)$$

The matrix of fundamental orthonormal functions for this equation is known, and has the form:

	1	2	3	4	
1	1	A_{12}	$-A_{13}/EI_i$	$-A_{14}/EI_i$	
2		A_{22}	$-A_{23}/EI_i$	$-A_{24}/EI_i$	
3		$-A_{32} \cdot EI_i$	A_{33}	A_{34}	
4				1	

$$\mathbf{A}_i = \quad (5)$$

where

$$A_{12} = \frac{\sin(t_i x)}{t_i}; A_{13} = \frac{1 - \cos(t_i x)}{t_i^2}; A_{14} = \frac{t_i x - \sin(t_i x)}{t_i^3};$$

$$A_{22} = \cos(t_i x); A_{32} = \sin(t_i x); t_i = \sqrt{F/EI_i} \quad (6)$$

Rigidity parameters entered into matrix $\mathbf{A}_i$ for more simple fulfillment of the conditions of connection plots in the internal points of the beam. Values EI_i are most easily calculated in the middle of each

plot. The cross section of the cone is a circle, and the diameter varies according to the law (Fig. 1, a):

$$d(x) = d_1(a + bx^k), \quad (7)$$

where a, b are coefficients;

k is exponent.

The matrix $A_*(l, F)$ of equation (3) is formed in the following way. Let $n = 3$ (Fig. 1b). The matrices of initial and final parameters of the discretized

beam are compiled. They take into account the boundary conditions of the bearing and the conditions for the continuity of the parameters of bending at the internal points.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_* = & \begin{array}{c|c} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} V_{(0)}^{1-2} = 0; \varphi_{(l)}^{3-4} \\ \varphi_{(0)}^{1-2} \\ M_{(0)}^{1-2} = 0; Q_{(l)}^{3-4} \\ Q_{(0)}^{1-2} \\ V_{(0)}^{2-3} \\ \varphi_{(0)}^{2-3} \\ M_{(0)}^{2-3} \\ Q_{(0)}^{2-3} \\ V_{(0)}^{3-4} \\ \varphi_{(0)}^{3-4} \\ M_{(0)}^{3-4} \\ Q_{(0)}^{3-4} \end{array} \end{array} \quad \mathbf{Y} = \begin{array}{c|c} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} V_{(l)}^{1-2} = V_{(0)}^{2-3} \\ \varphi_{(l)}^{1-2} = \varphi_{(0)}^{2-3} \\ M_{(l)}^{1-2} = M_{(0)}^{2-3} \\ Q_{(l)}^{1-2} = Q_{(0)}^{2-3} \\ V_{(l)}^{2-3} = V_{(0)}^{3-4} \\ \varphi_{(l)}^{2-3} = \varphi_{(0)}^{3-4} \\ M_{(l)}^{2-3} = M_{(0)}^{3-4} \\ Q_{(l)}^{2-3} = Q_{(0)}^{3-4} \\ V_{(l)}^{3-4} = 0 \\ \varphi_{(l)}^{3-4} \\ M_{(l)}^{3-4} = 0 \\ Q_{(l)}^{3-4} \end{array} \end{array} \quad (8)
 \end{aligned}$$

From the matrix $\mathbf{X}_*$ it follows that in the matrix $\mathbf{A}_*$ you need to reset 1 and 3 columns. Into place of the zero parameters of the matrix $\mathbf{X}_*$ carry the independent matrix $\mathbf{Y}$ parameters. The dependent matrix

$\mathbf{Y}$ parameters are transferred according to the equations of their connection. As a result, the matrix $\mathbf{A}_*$ is supplemented with compensating elements. The beam stability matrix will look like:

$$\mathbf{A}_* = \begin{array}{c|cccccccccccc} \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{array} \end{array} \quad (9)$$

Matrix equations (3) are similarly formed for beams with other support conditions. From equation (3) by the search method you can determine the critical forces that are provided in the form:

$$F_{кр} = \frac{\lambda^2 EI_{min}}{l^2} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{(\mu l)^2} \quad (10)$$

where λ is dimensionless critical force parameter;

μ is effective length factor.

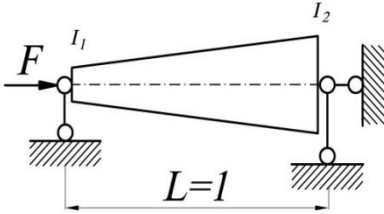
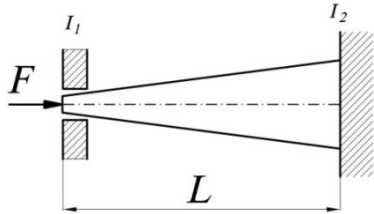
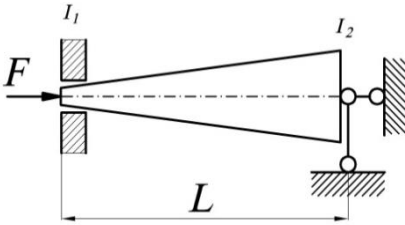
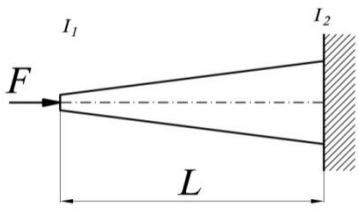
There is dependence between λ and μ .

$$\lambda\mu = \pi \quad (11)$$

The practice of solving problems with variable coefficients shows that the results are almost accurate even with the number of plots $n \geq 30$ [1–13]. For the problems of works [14, 15] the matrix A^*

was formed automatically according to the program in the MATLAB environment with $n = 50$. Table 1 presents the parameters λ for the first three critical forces of various cone-shaped beams with a $a=1$; $b=0,01$; $k=1$; $L=1$.

Table 1 – The first three parameters of critical forces

Parameter λ		
λ_1	3,1729	6,3474
λ_2	6,3463	9,0664
λ_3	9,5210	12,6886
Parameter λ		
λ_1	4,5378	1,5931
λ_2	7,8023	4,7611
λ_3	11,0157	7,9346

The data in Table 1 can be compared with the results of work [14, 15]. Using the Green function allowed us to obtain an accurate result for λ_1 with hinged support [14]

$$\lambda_1 = 3,17 \quad (12)$$

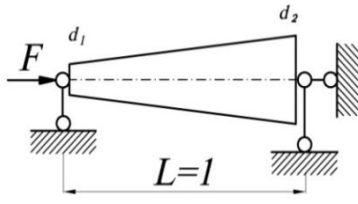
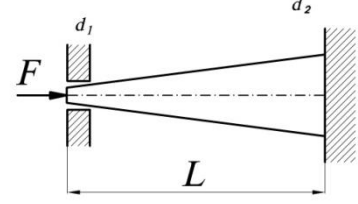
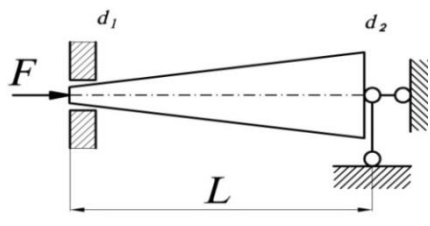
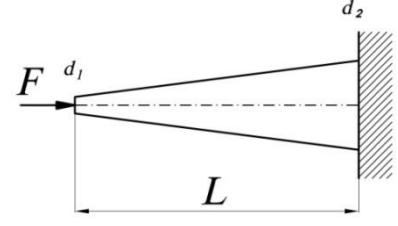
It can be seen that the BEM results and works [14] coincide. Using the integral equations, the approximate value $\lambda_1 = 3.11$ was obtained in the work [15]. Although this result is little different from the accurate result but it is unreliable. The value of λ_1 for a cone-shaped beam must be greater than π . Table 2 presents the parameter values λ_1 depending on the diameter ratio of the cone-shaped beams with $a=1$; $L=1$; $k=1$.

The table 2 shows that with a smooth change in the transverse dimensions of the rod it is possible to significantly increase the critical forces of such structures as columns, chimneys, various supports, TV and radio towers, towers.

Conclusions

The analysis of the presented material shows that the method of calculating the beam stability with distributed parameters, based on BEM, allows you to solve effectively, accurately and reliably the complex problems, which don't have an analytical solution. In particular, for cone-shaped (also pyramid-shaped) beams, it is not necessary to form a rather cumbersome Green function [14] or to solve the integral equations [15]. In BEM it is sufficient to use only the system of fundamental orthonormal functions of the corresponding differential equation with constant coefficients. An additional advantage is the minimum requirements for variable coefficients of the differential equation. They can have breaks of the 1-st kind, break points, and an arbitrary set of continuous functions [1–13], which significantly expands the range of the solvable problems not only in the stability theory, but also in other sciences.

Table 2 – Parameters λ_1 when changing the diameter ratios of cross section

$\frac{d_2}{d_1}$	b		
2	1	6,2817	12,5658
3	2	9,4207	18,8627
4	3	12,5579	25,1635
5	4	15,6908	31,4722
6	5	18,8175	37,7929
$\frac{d_2}{d_1}$	b		
2	1	8,9833	4,0583
3	2	13,4870	6,8630
4	3	17,9917	9,8194
5	4	22,4967	12,8452
6	5	27,0185	15,9060

References

- Orobej V. F. Ustojchivost' balok s raspredelennymi parametrami [Stability of beams with distributed parameters] / V. F. Orobej, G. V. Kostrova. – Pratsi Odesk. politekhn. un-tu. – Odesa, 2011. – Vyp. 1(35) – S. 15–23.
- Orobej, V. F. Chislenno-analiticheskoe reshenie kraevykh zadach dlja sistem obyknoven-nykh differencial'nykh uravnenij s peremennymi koeficientami [A numerical-analytical solution of boundary value problems for systems of ordinary differential equations with variable coefficients] / V. F. Orobej, G. V. Kostrova. – Trudy Odessk. politehn. un-ta. – Odesa, 2007. – Vyp. 1(27). – S. 23–30.
- Orobej, V. F. Reshenie zadachi ustojchivosti ploskoj formy izgiba tonkostennykh sterzhnevnykh sistem metodom granichnykh jelementov [Solution of the problem of stability of a flat shape of bending of thin-walled rod systems by the method of boundary elements] / V. F. Orobej, G. V. Kostrova. – Trudy Odessk. politehn. un-ta. – Odesa, 2007. – Vyp. 2(28). – S. 8–24.
- Orobej, V. F. Metod granichnykh jelementov v zadachah ustojchivosti arok [Boundary-element method in arches' stability problems] / V. F. Orobej, G. V. Kostrova, V. N. Purich. – Trudy Odessk. politehn. un-ta. – Odesa, 2009. – Vyp. 1(31). – S. 7–14.
- Orobej V. F. Raschet staticheski neopredelennykh balok s raspredelennymi parametrami / V. F. Orobej, I. B. Korneeva, D. O. Bondarenko. – Visnyk Odeskoi derzhavn. akademii budivn. ta arkhitekt. – Odesa, 2009. – Vip. 36. – S. 322–328.
- Dashhenko A. F. Chislenno-analiticheskij metod granichnykh jelementov [Numerical-analytical method of boundary elements] / A. F. Dashhenko, L. V. Kolomic, V. F. Orobej, N. G. Sur'janinov. – Odesa: VMV, 2010. – T.1. – 415 s. – T.2. – 510 s.
- Orobej V. F. Ustojchivost' ploskoj formy izgiba tonkostennykh sterzhnevnykh sistem [Stability of the flat form of bending thin-walled core systems] / V. F. Orobej, A. F. Chumak // Prikladnaja mehanika. – Kiev: Institut mehaniki NAN Ukrainy, 2009. – T. 45. – № 5. – S. 110–123.
- Orobej V. F. Kolebanija balok s peremennoj zhestkost'ju [Vibrations of beams with variable stiffness] / V. F. Orobej, K. S. Tymanjuk // Trudy Odessk. politehn. un-ta. – Odesa, 2010. – Vyp. 1(33) – 2(34). – S. 16–22.
- Dashhenko A. F. MATLAB v mehanike deformiruemogo tverdogo tela [MATLAB in the mechanics of a deformable solid] / A. F. Dashhenko, V. F. Orobej, N. G. Sur'janinov. – Har'kov: «Burun kniga», 2011. – 480 s.
- Orobej V. F. Praktikum po metodam reshenie kraevykh zadach [Workshop on methods for solving boundary value problems] / V. F. Orobej, N. G. Sur'janinov. – Odesa: Astroprint, 2011. – 408 s.
- Dorofeev V. S. Novye metody rascheta sistem s diskretno-nepreryvnym raspredeleniem

parametrov [New methods for calculating systems with discrete-continuous distribution of parameters] / V. S. Dorofeev, A. V. Kovrov, Ju. S. Krutij, V. F. Orobej, N. G. Sur'janinov, R. M. Tacij, T. I. Ushak. – Odessa: Jeven, 2012. – 378 s.

12. Orobej V. F. Metod granichnyh jelementov v zadachah ustojchivosti ploskoj formy izgiba balok prjamougol'nogo sechenija [Method of boundary element in problems of stability of plane bending beams of rectangular cross section] / V. F. Orobej, A. F. Dashhenko, L. V. Kolomiec, A. M. Limarenko. // Zbirnik naukovih prac' Odes'koї deržavnoї akademії tehničnogo reguluvannā ta ākostī. – Odesa, 2015. – Vyp. 2(7). – S. 47–54.

13. Orobej V. F. Metod granichnyh jelementov v zadachah rasheta mashinostroitel'nyh konstrukcij [The method of boundary elements in the problems of calculating engineering structures] / V. F. Orobej, A. Aniskin, A. F. Dashhenko, L. V. Kolomiec, A. M. Limarenko, B. Soldo. – Odessa: «Aprel'», 2016. – 761 s.

14. Bogacheva V. E. Funkcija Grina i zadacha na sobstvennye znachenija [Green's function and eigenvalue problem] / V. E. Bogacheva, I. N. Beljaeva, N. A. Chekanova, B. M. Bashkatov, N. N. Chekanova, I. S. Kuznecova. – Visnyk Khersonskoho nats. tekhnichn. un-tu. – Kherson, 2016. – № 3(58). – S. 15–19.

15. Mihlin S. G. Prilozhenie integral'nyh uravnenij k nekotorym problemam mehaniki, matematicheskoi fiziki i tehniki [Application of integral equations to some problems of mechanics, mathematical physics and engineering] / S. G. Mihlin. – M. – L.: OGIz tehn.–teor. lit., 1947. – 304 s.

Список использованных источников

1. Оробей В. Ф. Устойчивость балок с распределенными параметрами / В. Ф. Оробей, Г. В. Кострова. – Праці Одеськ. політехн. ун-ту. – Вип. 1(35) – Одеса, 2011. – С. 15–23.

2. Оробей, В. Ф. Численно-аналитическое решение краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами / В. Ф. Оробей, Г. В. Кострова. – Труды Одеск. політехн. ун-та. – Одеса, 2007. – Вип. 1(27). – С. 23–30.

3. Оробей, В. Ф. Решение задачи устойчивости плоской формы изгиба тонкостенных стержневых систем методом граничных элементов / В. Ф. Оробей, Г. В. Кострова. – Труды Одеск. політехн. ун-та. – Одеса, 2007. – Вип. 2(28). – С. 8–24.

4. Оробей, В. Ф. Метод граничных элементов в задачах устойчивости арок / В. Ф. Оробей, Г. В. Кострова, В. Н. Пурич. – Труды Одеск. Політехн. ун-та. – Одеса, 2009. – Вип. 1(31). –

С. 7–14.

5. Оробей В. Ф. Расчет статически неопределимых балок с распределенными параметрами / В. Ф. Оробей, И. Б. Корнеева, Д. О. Бондаренко. – Вісник Одеської державн. академії будівн. та архітект. – Одеса, 2009. – Вип. 36. – С. 322–328.

6. Дашенко А. Ф. Численно-аналитический метод граничных элементов / А. Ф. Дашенко, Л. В. Коломиец, В. Ф. Оробей, Н. Г. Сурьянинов. – Одеса: БМВ, 2010. – Т. 1. – 415 с. – Т. 2. – 510 с.

7. Оробей В. Ф. Устойчивость плоской формы изгиба тонкостенных стержневых систем / В. Ф. Оробей, А. Ф. Чумак // Прикладная механика. – Киев: Институт механики НАН Украины, 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 110–123.

8. Оробей В. Ф. Колебания балок с переменной жесткостью / В. Ф. Оробей, К. С. Тыманюк // Труды Одеск. політехн. ун-та. – Одеса, 2010. – Вип. 1(33) – 2(34). – С. 16–22.

9. Дашенко А. Ф. МАТЛАВ в механике деформируемого твердого тела / А. Ф. Дашенко, В. Ф. Оробей, Н. Г. Сурьянинов. – Харьков: «Бурун книга», 2011. – 480 с.

10. Оробей В. Ф. Практикум по методам решение краевых задач / В. Ф. Оробей, Н. Г. Сурьянинов. – Одеса: Астропринт, 2011. – 408 с.

11. Дорофеев В. С. Новые методы расчета систем с дискретно-непрерывным распределением параметров / В. С. Дорофеев, А. В. Ковров, Ю. С. Крутий, В. Ф. Оробей, Н. Г. Сурьянинов, Р. М. Таций, Т. И. Ушак. – Одеса: Эвен, 2012. – 378 с.

12. Оробей В. Ф. Метод граничных элементов в задачах устойчивости плоской формы изгиба балок прямоугольного сечения / В. Ф. Оробей, А. Ф. Дашенко, Л. В. Коломиец, А. М. Лимаренко. // Збірник наукових праць Одеськ. держ. академії технічного регулювання та якості. – Одеса, 2015. – Вип. 2(7). – С. 47–54.

13. Оробей В. Ф. Метод граничных элементов в задачах расчета машиностроительных конструкций / В. Ф. Оробей, А. Анискин, А. Ф. Дашенко, Л. В. Коломиец, А. М. Лимаренко, Б. Солдо. – Одеса: «Апрель», 2016. – 761 с.

14. Богачева В. Е. Функция Грина и задача на собственные значения / В. Е. Богачева, И. Н. Беляева, Н. А. Чеканова, Б. М. Башкатов, Н. Н. Чеканова, И. С. Кузнецова. – Вісник Херсонського нац. технічн. ун-ту. – Херсон, 2016. – № 3(58). – С. 15–19.

15. Михлин С. Г. Приложение интегральных уравнений к некоторым проблемам механики, математической физики и техники / С. Г. Михлин. – М. – Л.: ОГИЗ техн.–теор. лит., 1947. – 304 с.

Надійшла до редакції 03.12.2018

УДК 629.01

Н. М. Арцибашева¹, к.т.н., Т. М. Меленчук¹, д.т.н., О. В. Ковра², Б. Ч. Бердієв¹¹Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса²Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕТЕРОГЕННОСТІ ЗВАРНИХ ШВІВ НА РЕСУРС
ТРИМАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИЧЕПА**

У роботі розглянуті питання впливу структурної гетерогенності зварних швів на ресурс конструкції причепа. Розглянуті загальні питання стосовно конструкцій причепів та фізичних властивостей зварних з'єднань. Об'єктом дослідження є структурна гетерогенність зварних швів конструкції, що несе, причепа БМЗ-887. Для дослідження використовувались такі методики: методика тензометричних досліджень, методика кількісної металографії. У роботі представлені експериментальні дані, які отримані за допомогою вище вказаних методик, та проведений порівняльний аналіз цих даних. Отримані числові значення параметрів гетерогенності та швидкості розповсюдження втомних тріщин у зварних з'єднаннях.

Ключові слова: Зварна конструкція, причіп, гетерогенність, тензометрія, тріщина, ресурс.

Н. Н. Арцыбашева, к.т.н., Т. М. Меленчук, д.т.н., А. В. Ковра, Б. Ч. Бердыев**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ НА РЕСУРС
НЕСУЩИХ СИСТЕМ ПРИЦЕПА**

В работе рассмотренные вопросы влияния структурной гетерогенности сварных швов на ресурс конструкции прицепа. Рассмотренные общие вопросы относительно конструкций прицепов и физических свойств сварных соединений. Объектом исследования является структурная гетерогенность сварных швов конструкции, которая несет прицепа БМЗ-887. Для исследования использовались такие методики: методика тензометрических исследований, методика количественной металлографии. В работе представлены экспериментальные данные, которые получены с помощью выше указанных методик, и проведен сравнительный анализ этих данных. Полученные числовые значения параметров гетерогенности и скорости распространения усталостных трещин в сварных соединениях

Ключевые слова: Сварная конструкция, прицеп, гетерогенность, тензометрия, трещина, ресурс.

N. N. Arcybasheva, PhD, T. M. Melenchuk, DSc, A. V. Kovra, B. Ch. Berdiev**RESEARCH OF INFLUENCE OF THE HETEROGENEITY OF WELDED SEAMS ON THE
RESOURCE OF BEARING SYSTEMS OF THE TRAILER**

The paper considered the issues of the influence of structural heterogeneity of welds on the life of the trailer design. Mainly in the works on welded structures, the effect of stress concentration during welding on the strength and crack resistance of the weld is considered and the possibilities of reducing temperature differences and deformations, which create the main threat of microcracks, are examined. One of the essential features of welded joints is the structural-mechanical inhomogeneity of the metal. The nature and properties of this heterogeneity as a factor in the destruction of welded joints is not fully determined. Therefore, the object of this study is the structural heterogeneity of welds of the supporting structure of the trailer BMZ-887.

General questions are considered regarding the trailer designs and physical properties of welded joints and the peculiarities of heterogeneity of the heat-affected zone or near the suture zone. For the study, we used the following methods: tensometric research, quantitative metallography. The paper presents experimental data that were obtained using the above mentioned methods, and a comparative analysis of these data was carried out. The relationship between the numerical values of the parameters of the weld heterogeneity and the propagation velocity of small and main fatigue cracks in welded joints is established.

The numerical values of the heterogeneity parameters and the propagation speeds of fatigue cracks in

the welded joints of the following types were obtained: the propagation speed of small cracks decreases slightly with increasing diameter of the second phase particles; particle diameter does not significantly affect the propagation velocity of trunk cracks; the effect of concentration (distance between particles) for small cracks is not significant; for trunk cracks with increasing particle density, the rate of propagation of cracks is somewhat reduced.

Keywords: Weldment, trailer, heterogeneity, straining, crack, resource.

DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-21-27

Вступ. Прогнозування ресурсу деталей машин та підвищення його при одночасному зниженні матеріалоемності є однією з основних задач проектування та технології виготовлення деталей машин і елементів конструкцій. Підвищенню стійкості до втомлюваності зварних конструкцій у літературі присвячується багато уваги [1, 2, 3]. Однак вплив мікроструктури зон зварювальних швів на механічні властивості всієї зварної конструкції вивчено недостатньо [4, 5, 6].

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Відомо, що значний вплив на опір до стомлювання дають механічні та структурні неоднорідності зварних з'єднань. Механічні властивості зварних з'єднань освітлені у багатьох роботах [7, 8, 9], але цього не можна сказати про структурні неоднорідності. В цей же час відомо, що структурна гетерогенність значно впливає на кінетику втомного пошкодження [5, 6]. Недостатньо відомостей про зв'язок структури зварних з'єднань з границею витривалості. В основному в роботах [8, 9, 10] розглядають вплив концентрації напруги при зварюванні на міцність і тріщинозміцність зварного шва і досліджують можливості зменшення температурних перепадів і де-

формацій, які створюють основну загрозу появи мікротріщин.

Найбільш металоемними та значимими при визначенні характеру ремонту машин є конструкції несучих систем, до яких відносяться, зокрема, рами.

Оскільки рама причепа є зварною конструкцією, тому в роботі можливість підвищення ресурсу всієї системи за рахунок зміни структури зварного шва вивчалася на прикладі причепа БМЗ-887 (див. рис. 1). Причіп БМЗ-887 є конструкцією вагою 1,7 т, що складається з рами, платформи, ходової частини, дишла, поворотного пристрою, гальмівної системи, перевертаючого механізму, електроустаткування буксированого пристрою. Рама причепа зварена з двох лонжеронів, трьох поперечок, заднього візка, і задніх опорних кронштейнів кузова (див. рис. 1). Перша поперечка рами виготовлена з швелера і приварена до стійки і країв полиць лонжерона. Вузли з'єднань з лонжероном посилені пластинами, привареними згори і знизу. З'єднання лонжеронів з третьою поперечкою відкритого профілю посилене косинками.

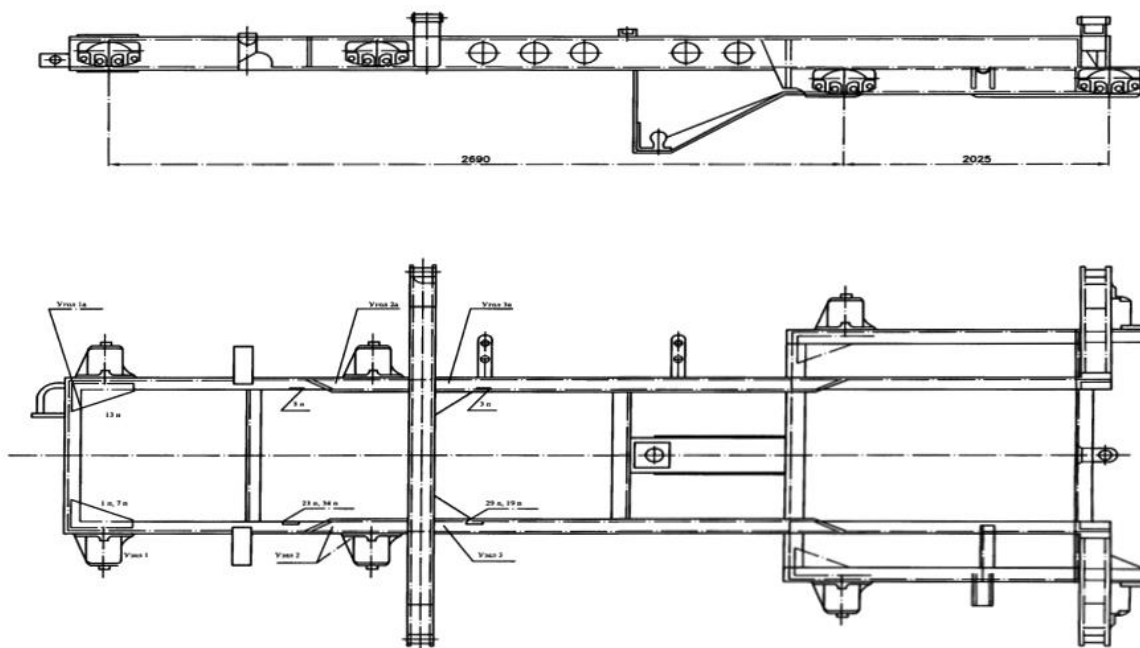


Рисунок 1 – Рама причепа [10, 11]

Дослідження пов'язане з однією з головних особливостей зварних з'єднань – неоднорідністю властивостей окремих ділянок зварного з'єднання (див. рис. 2).

Як видно з рисунку 2, у зварному шві розрізняють 3 зони: 1 – шов (лита структура); 2 – колошовна зона, нагріта у процесі зварки більш критичних крапок; 3 – колошовна зона, нагріта у процесі зварки нижче критичних крапок. У зоні термічного впливу можна розрізнити ряд ділянок. Ділянка 1 товщиною до 2 мм прилягає безпосередньо до шву та відповідає нагріву вище 1000-1100 °С. На цій ділянці утворюється круп-

нозерниста структура. Ділянка 2 (товщиною 0,5-2 мм) проходить такий нагрів та охолодження у процесі зварки, який можна порівняти з нормалізацією, у результаті чого отримується дрібне зерно. Ділянка 3 товщиною 0,5-1,0 мм характеризується лише частковою перекристалізацією та подрібненням зерен основного металу. Ділянка 4 завширшки 2-5 мм нагрівається до 500-440 °С. Ділянка 5 завширшки 4-20 мм нагрівається до 250-350 °С та не зазнає структурних змін, а може мати лише старіння. Пластичність цих ділянок нижча, а твердість вища, ніж у основного металу

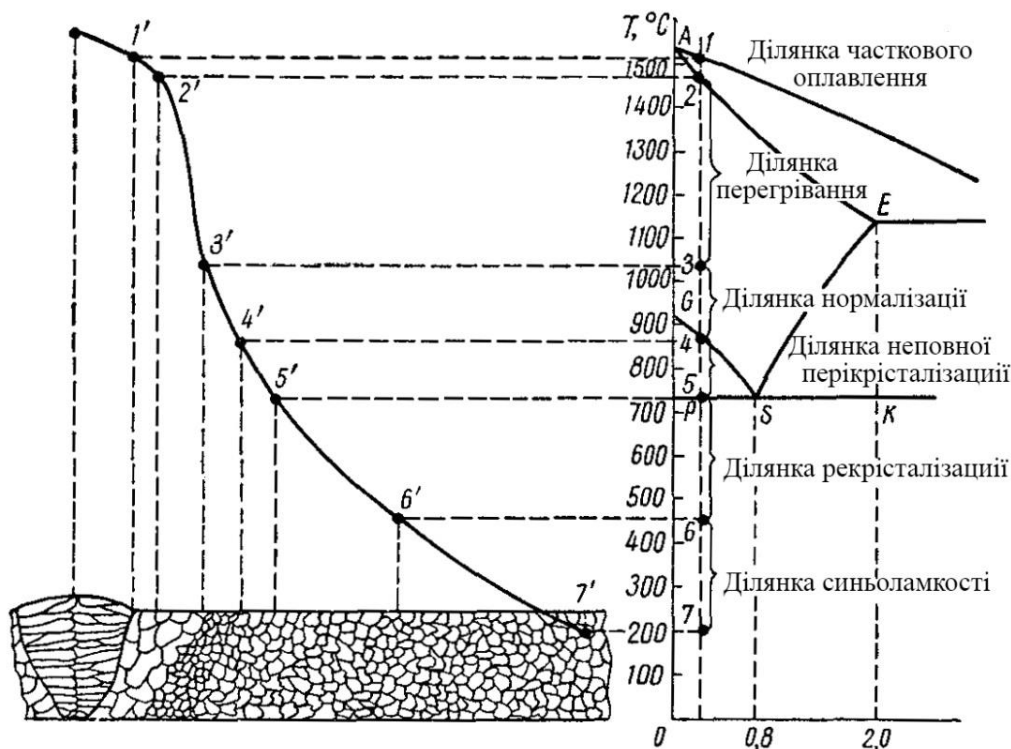


Рисунок 2 – Схема будови однопрохідного зварного з'єднання вуглецевої сталі

Склад колошовної зони у процесі зварки міняється. Характеристиками геометрії структури, які значним чином впливають на руйнування конструкції у процесі експлуатації, є параметри гетерогенності структури. Ці характеристики визначались за допомогою кількісної металографії [11, 13].

Метою статті є вивчення впливу структурної гетерогенності зварних швів на ресурс зварної конструкції причепа. У зв'язку з цим необхідно було визначити закономірності формування структурної неоднорідності зварного шва та руйнування зон зварних швів у процесі втомних випробувань.

Викладення основного матеріалу

Для вивчення втомного руйнування у різних зонах зварного шва були взяті 3 модельних спла-

ви з різними поєднаннями характеристик гетерогенності. При цьому вимірялися розміри частинок другої фази, щільність цих частинок і їх сумарний об'єм.

При вивченні структури встановлено, що у зварному з'єднанні сумісно працюють основний метал, метал шва та перехідний чи колошовний. Метали цих трьох зон можуть мати різні механічні властивості в залежності від основного металу, від виду та режимів зварки, від властивостей використаних електродної проволоки і флюсу, від наявності термічної обробки и т.п.

Для зварних з'єднань, що працюють у тих чи інших умовах, визначаються різноманітні механічні властивості металу трьох зон. Для цього вирізають зразки для випробувань в цілому з відповідної зони (наприклад, зі шва) чи розташо-

вують робочий перетин зразка у зоні, яка досліджується (наприклад, колошовний).

Вірний вибір зварних матеріалів, режимів зварки, термічної обробки дозволяє отримати відповідні механічні властивості металу шва та колошовної зони не гірші чи близькі до властивостей основного металу.

Тому були взяті у якості модельних матеріалів 3 типа зразків, що відрізняються розмірами часток d_{cp} від 0,03 до 0,2 щільністю розподілення цих часток від 20 % до 40 % та відстанями між ними від 200 до 400 мкм (див. табл. 1). Зразки сплавів з різним ступенем гетерогенності піддавалися втомним випробуванням.

Для дослідження структурного фактора використовувалась стандартна методика кількісної металографії, яка дозволяє визначити параметри гетерогенності на модельних зразках. Розглянутими параметрами гетерогенності були: середній діаметр частинок, мкм; сумарний обсяг частинок, %; щільність частинок.

При певному числі циклів за допомогою металографічного аналізу проводилася фіксація приросту довжини тріщини. Відношення dl/dN (мкм/цикл) являє собою швидкість зростання тріщини. Тріщини завдовжки до 10 мкм прийнято називати малими тріщинами, а більшої довжини – магістральними тріщинами. Зазвичай малі тріщини структурних складових матеріалу. Тому у роботі розглянуто впливи характеристик гетерогенності на розподіл швидкостей зростання втомних малих (див. табл. 2) і магістральних тріщин (див. табл. 3).

За цими даними за допомогою пакету MATLAB були отримані залежності $V_{тр} = f(d_{cp})$; $V_{тр} = f(U)$; $V_{тр} = f(N_{dcp})$; для малих і магістральних тріщини для різних рівнів напружень (див. рис. 2, 3). Для малих тріщин залежності $V = f(d_{cp})$ швидкості зростання тріщини від діаметру частинок мають степеневий характер, причому помітна тенденція деякого зменшення швидкості розповсюдження тріщини із збільшенням діаметру частинок другої фази.

Причому ця тенденція зберігається при всіх напруженнях, що прикладаються, 180-215 МПа, але чим вище напруження, тим вище швидкість розповсюдження тріщин. Падіння швидкості розповсюдження тріщин спостерігається при розмірі частинок $d_{cp} = 0,1$ мм і більше. Це пов'язано з тим, що частинки грають двояку роль: концентратором напружень, тобто джерелом виникнення і розповсюдження тріщин, але і

стопором тріщин. Таким чином, окрім розмірів частинок на швидкість тріщин впливає щільність цих частинок. Для малих тріщин щільність майже не позначається при меншій нарузі, але із збільшенням напружень, що додаються, швидкість розповсюдження тріщин дещо зменшується із збільшенням частинок ($V = f(U)$) до 30 %, а потім збільшується $V_{тр}$ із збільшенням щільності до 40 %.

При аналізі результатів досліджень для магістральних тріщин встановлено, що швидкість розповсюдження магістральних тріщин також дещо зменшується із збільшенням діаметру частинок, але вона менш чутлива до цього параметра, ніж малі тріщини. При дослідженні впливу щільності частинок видно, що із збільшенням щільності до 38-40 % швидкість тріщин росте.

Відомо, що структурна гетерогенність є визначальною у кінетиці втомного пошкодження. Тому у дослідницькій частині роботи збиралась інформація про концентраційну здатність структури у різних зонах зварного шва, і, у першу чергу, про розміри часток другої фази, які є концентраторами для зароджування і активаторами чи стопорами при розповсюдженні тріщини.

На основі експериментів з використанням пакета MATLAB були побудовані графіки (див. рис. 3, 4) для залежностей швидкості розповсюдження втомних тріщин у шарах трьох типів зварних з'єднань в залежності від різних параметрів гетерогенності.

З цих графіків встановлено, що зі збільшенням напружень, які викликають руйнування, від 180 МПа до 275 МПа швидкість зростає не дуже швидко в залежності від d , N , U . Але зі збільшенням напружень частки 0,03-0,1 мкм починають більш явно грати роль концентраторів.

Для магістральних тріщин розмір діаметра має менший вплив, але зі збільшенням напружень від 200 МПа до 300 МПа швидкість значно збільшується.

Залежності для U та N_{dcp} для магістральних тріщин ідентичні, але швидкості розповсюдження тріщин зі збільшенням σ збільшуються суттєво.

Проаналізувавши отримані залежності, встановили, що швидкість розповсюдження малих тріщин найменша за умови, якщо зварний шов має таку ж гетерогенність, як тип 2; швидкість розповсюдження магістральних тріщин найменша за умови, що зварний шов має таку ж гетерогенність, як типи 1 та 3.

Таблиця 1 – Розподіл сумарного об'єму частинок U , середнього розміру частинок d_{cp} , та щільності частинок N_d в залежності від типу зварного шва

Випробування	1 тип			2 тип			3 тип		
	d_{cp} , мкм	U , %	N_{dcp} , мкм	d_{cp} , мкм	U , %	N_{dcp} , мкм	d_{cp} , мкм	U , %	N_{dcp} , мкм
1	0,1	20	400	0,2	40	300	0,03	45	-
2	0,1	22	400	0,17	30	300	0,03	40	250
3	0,1	30	370	0,03	25	330	0,05	20	300
4	0,07	32	320	0,03	37	400	0,09	38	390
5	0,03	33	200	0,04	20	300	0,07	-	-

Таблиця 2 – Зміна швидкості малих тріщин в залежності від типу зварного шва та напруження, яке прикладається

Випробування	Малі тріщини $V_1, \frac{\text{мкм}}{\text{цикл}} \cdot 10^{-2}$								
	$\sigma = 180 \text{ МПа}$			$\sigma = 200 \text{ МПа}$			$\sigma = 214 \text{ МПа}$		
	1 тип	2 тип	3 тип	1 тип	2 тип	3 тип	1 тип	2 тип	3 тип
1	0,8	1,3	3,5	3,0	0,7	8,0	10,0	-	-
2	0,8	1,3	3,5	2,6	0,7	3,0	10,0	-	-
3	0,6	3,0	5,8	2,8	1,8	3,9	6,5	-	-
4	0,7	4,0	7,7	3,4	2,0	4,8	5,5	-	14,0
5	0,8	5,0	8,2	3,0	2,5	5,0	6,0	4,0	10,0
6	-	5,5	8,7	-	2,5	4,5	-	2,0	5,0
7	-	-	10,4	-	-	4,5	-	-	1,0

Таблиця 3 – Зміна швидкості магістральних тріщин

Випробування	Магістральні тріщини $V_1, \frac{\text{мкм}}{\text{цикл}} \cdot 10^{-2}$					
	$\sigma = 273 \text{ МПа}$			$\sigma = 300 \text{ МПа}$		
	1 тип	2 тип	3 тип	1 тип	2 тип	3 тип
1	1	-	-	-	-	-
2	1	1	1	3	5	8
3	2	4	5	4	7	8
4	4	7	6	7	9	9
5	5	9	7	9	12	11
6	5	12	3	10	15	13
7	6	17	11	14	17	16
8	6	19	13	15	17	17
9	13	40	27	23	33	20
10	20	70	42	-	52	44

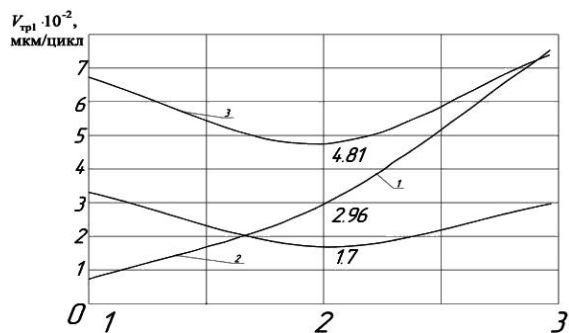


Рисунок 3 – Залежність швидкості розповсюдження малих тріщин від типу гетерогенності при напруженнях (МПа): 180 (1), 200 (2) і 215 (3)

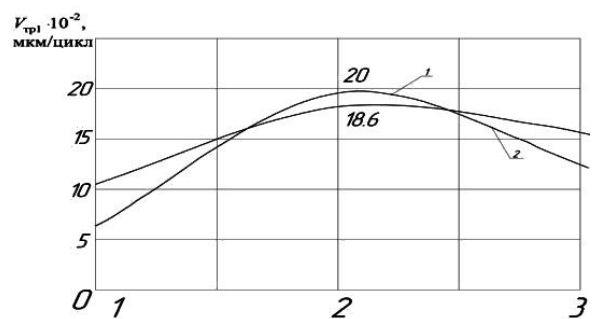


Рисунок 4 – Залежність швидкості розповсюдження магістральних тріщин від типу гетерогенності при напруженнях (МПа): 275 (1) і 300 (2)

Висновки

Таким чином отримані числові значення параметрів гетерогенності та швидкості розповсюдження втомних тріщин у зварних з'єднаннях трьох типів:

- швидкість розповсюдження малих тріщин дещо зменшується при збільшенні діаметра частинок другої фази;
- на швидкість розповсюдження магістральних тріщин діаметр частинок суттєво не впливає;
- вплив концентрації (відстані між частинками) для малих тріщин не значний;
- для магістральних тріщин зі збільшенням щільності частинок швидкість розповсюдження тріщин дещо знижується.

Список використаних джерел

1. Панкратов Н. М. Ускоренные испытания мобильных машин и их элементов: монография / Н. М. Панкратов, Н. Д. Боровский. – Одесса: Черноморье, 1998. – 198 с.
2. Григоренко В. С. Оценка трещиностойкости металла сварных соединений по результатам стандартных механических испытаний с учётом размеров структурных элементов / В. С. Григоренко, М. Д. Рабкина // Автоматическая сварка. – 2006. – № 6. – С. 21–26.
3. Винокуров В. А. и др. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности. / Под редакцией Патона Б. Е. – М.: Машиностроение, 1996. – 570 с.
4. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
5. Влияние стадии нагрева на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей / А. М. Савицкий, В. Г. Васильев, М. М. Савицкий, В. Н. Ващенко // Автомат. сварка. – 2005. – № 1. – С. 19–21.
6. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 215 с.
7. ДСТУ 3761.3–98. Зварювання та споріднені процеси. Частина 3. Зварювання металів: з'єднання та шви, технологія, матеріали та устаткування. Терміни та визначення. – Київ: Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України, 1999. – 54 с.
8. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 620 с.
9. В. И. Савуляк, С. А. Заболотный, Д. В. Бакалец Минимизация деформаций и тепловых воздействий в рамных конструкциях при приваривании накладок для усиления //

Научові праці ВНТУ: сб. Машиностроение и транспорт. – 2012. – № 4. – С. 1–6.

10. Арцибашева Н. М. Изменение напряжений в раме прицепа при развитии повреждений / Н. М. Арцибашева, Д. С. Дерешов, Н. М. Панкратов // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2004. – Вып. 2(22). – С. 40–43.

11. Арцибашева Н. М. Прогнозирование ресурса рамы прицепа. / Н. М. Арцибашева, Д. С., Дерешов О. М. Белецкая // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2007. – Вып. 2(28). – С. 50–53.

12. Теоретичні основи та розрахунки експлуатаційних властивостей спеціалізованого рухомого складу : навчальний посібник ; за заг. ред. Т. М. Меленчук / Т. М. Меленчук, Н. М. Арцибашева, Л. М. Петров, П. М. Павлішин, В. М. Меленчук. – Одеса : Чорномор'я, 2018. – 104 с.

13. Арцибашева Н. М. Влияние структурного фактора на усталостное разрушение сварных швов / Н. М. Арцибашева, О. М. Белецкая // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса, 2008. – Вып. 2(30). – С. 52–55.

14. Палаш Р. В. Визначення раціональних факторів впливу на залишкові напруження в зварних з'єднаннях конструкцій із високоміцних сталей / Р. В. Палаш // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн.праць. – Львів : УкрДЛТУ. – 2006. – № 16.6. – С. 87–89.

References

1. Pankratov N. M., Borovskij N. D. Uskorenny'e ispytaniya mobil'ny'x mashin i ix e'lementov monografiya. – Odessa : Chernomor'e, 1998. – 198 s.
2. Ocenka treshhinostojkosti metalla svarny'x soedinenij po rezul'tatam standartny'x mexanicheskix ispytanij s uchyotom razmerov strukturny'x e'lementov / V. S. Grigorenko, M. D. Rabkina // Avtomaticheskaya svarka. – 2006. – № 6. – S. 21–26.
3. Vinokurov V. A. i dr. Svarny'e konstrukcii. Mexanika razrusheniya i kriterii rabotosposobnosti. / Pod redakciej Patona B. E. – M.: Mashinostroenie, 1996. – 570 s.
4. Bolotin V. V. Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 312 s.
5. Vliyanie stadii nagreva na formirovanie struktury` svarny'x soedinenij zakalivayushhixsy stalej / A. M. Saviczkiy, V. G. Vasil'ev, M. M. Saviczkiy, V. N. Vashhenko// Avtomat. svarka. – 2005. – № 1. – S. 19– 21.

6. Trufiyakov V. I. Ustalost' svarny'x soedinenij. – Kiev: Nauk. dumka, 1973. – 215 s.

7. DSTU 3761.3–98. Zvariuvannia ta sporidneni protsesy. Chastyna 3. Zvariuvannia metaliv: ziednannia ta shvy, tekhnolohiia, materialy ta ustatkuvannia. Terminy ta vyznachennia. – Kyiv: Derzhavnyi komitet standartyzatsii metrolohii ta sertyfikatsii Ukrainy, 1999. – 54 s.

8. Maxnenko V. I. Resurs bezopasnoj e'kspluatatsii svarny'x soedinenij i uzlov sovremenny'x konstrukcij. – Kiev: Nauk. dumka, 2006. – 620 s.

9. V. I. Savulyak, S. A. Zabolotny'j, D. V. Bakalecz Minimizaciya deformacij i teplovy'x vozdeystvij v ramny'x konstrukciyax pri privarivanii nakladok dlya usileniya // Naukovi pratsi VNTU: sb. Mashinostroenie i transport. – 2012. – # 4 – S. 1–6.

10. Arcibasheva N. M. Izmenenie napryazhenij v rame pricepa pri razvitii povrezhdenij / N. M. Arcibasheva, D. S. Dereshov, N. M. Pankratov // Trudy` Odesskogo politexnicheskogo universiteta. – Odessa, 2004. – Vy`p. 2(22). – S. 40–43.

11. Arcibasheva N. M. Prognozirovanie

resursa ramy` pricepa. / N. M. Arcibasheva, D. S., Dereshov O. M. Belecckaya // Trudy` Odesskogo politexnicheskogo universiteta. – Odessa, 2007. – Vy`p. 2(28). – S. 50–53.

12. Teoretychni osnovy ta rozrakhunky ekspluatatsiinykh vlastyvostei spetsializovanoho rukhomoho skladu : navchalnyi posibnyk ; za zah. red. T. M. Melenchuk / T. M. Melenchuk, N. M. Artsybasheva, L. M. Petrov, P. M. Pavlishyn, V. M. Melenchuk. – Odesa : Chornomoria, 2018. – 104 s.

13. Arcibasheva N. M. Vliyanie strukturnogo faktora na ustalostnoe razrushenie svarny'x shvov / N. M. Arcibasheva, O. M. Belecckaya // Trudy` Odesskogo politexnicheskogo universiteta. – Odessa, 2008. – Vy`p. 2 (30). – S. 52–55.

14. Palash R. V. Vyznachennia ratsionalnykh faktoriv vplyvu na zalyshkovi napruzhenia v zvarnykh ziednanniakh konstruktii iz vysokomitsnykh stalei / R. V. Palash // Naukovyi visnyk UkrDLTU : zb. nauk.-tekhn.prats. – Lviv : UkrDLTU. – 2006. – # 16.6. – S. 87–89.

Надійшла до редакції 26.11.2018

УДК 534.29+539.5

В. А. Машенко¹, к.ф.-м.н. **В. П. Квасніков²**, д.т.н.

¹Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

²Київський національний авіаційний університет, м. Київ

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ПРОХОДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ ЧЕРЕЗ ЗАНУРЕНУ У РІДИНУ ПЛАСТИНУ

В статті представлені теоретичні розрахунки коефіцієнтів відбивання та прозорості для ультразвукової хвилі, що падає на поверхню пластини, зануреної в рідину. Розраховані критичні кути падіння ультразвукової хвилі з рідини, при яких у пластині з полімерних матеріалів, що мають різні за знаком та величиною значення коефіцієнта Пуассона, поширюється тільки поперечна хвиля. Проаналізовані умови повного відбивання для падаючої хвилі та прозорості для поперечної хвилі при критичних кутах падіння. Визначені товщини пластини для полімерних матеріалів, при яких відбувається повне відбивання та повне проходження падаючої хвилі.

Ключові слова: ультразвукові хвилі, коефіцієнт Пуассона, іммерсійний метод, коефіцієнти відбивання та прозорості.

В. А. Машенко, к.ф.-м.н., **В. П. Квасніков**, д.т.н.,

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕННУЮ В ЖИДКОСТЬ ПЛАСТИНУ

В статье представлены теоретические расчеты коэффициентов отражения и прозрачности для ультразвуковой волны, падающей на поверхность пластины, погруженной в жидкость. Произведен расчет критических углов падения ультразвуковой волны, при которых в пластине с полимерных материалов, что имеют различные за знаком и величиной значения коэффициента Пуассона, распространяется только поперечная волна. Проанализированы условия полного отражения для падающей волны и прозрачности для поперечной волны при критических углах падения. Определены толщины пластины для полимерных материалов, при которых происходит полное отражение и полное прохождение падающей волны.

Ключевые слова: ультразвуковые волны, коэффициент Пуассона, иммерсионный метод, коэффициенты отражения и прозрачности.

V. A. Mashchenko, PhD, V. P. Kvasnikov, DSc

ANALYSIS OF PARAMETERS OF THE MODEL OF ULTRASONIC WAVES PASSAGE THROUGH THE PLATE SHIPPED INTO LIQUID

The physical-mathematical model of the fall of an ultrasonic wave falling on the surface of a plate immersed in a liquid has been considered. The parameters of the model are the angle of incidence of the ultrasonic wave, the reflection and transparency coefficients for the incident wave and the thickness of the plate. This model is a theoretical basis for the practical implementation of the immersion method for measuring the velocities of propagation of longitudinal and transverse waves in samples of different materials. According to the experimental results of the propagation velocities of the longitudinal and transverse waves, the Poisson's ratio of the material is determined. The materials of a typical plate are polymers that have different Poisson ratio in sign and magnitude. If the angle of incidence does not exceed the corners of the total internal reflection on the boundary of the liquid – solid for the longitudinal and transverse waves propagation in the plate, then the reflection and transparency coefficients are the real numbers. In this case, the squares of the modules of these quantities are the reflection and transparency coefficients of the energy of the wave. For the incident ultrasonic wave, reflection and transparency coefficients are calculated, depending on the angle of the incidence, the thickness of the plate and the material of the plate. The analysis of the obtained results shows that the functional dependences of the energy coefficients of reflection and transparency are clearly expressed maxima and minima at different angles and plate thickness. For this purpose, the conditions for full reflection for incident waves and transparency for a transverse wave at critical angles of incidence are analyzed. The critical angles of fall of an ultrasonic wave from a liquid are calculated, under which in a plate only a transverse wave propagates. Determined thickness of the plate for polymeric materials, in which there is a complete reflection and full passage of the incident wave.

Keywords: ultrasonic waves, Poisson's ratio, immersion method, reflection and transmission coefficients.

DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-27-32

Вступ

В сучасному приладобудуванні важливим фактором є вимірювання механічних характеристик (коефіцієнт Пуассона, пружні модулів) конструкційних полімерних матеріалів. Найбільш інформативними параметрами, які дозволяють оцінити механічні характеристики полімерного матеріалу як твердого тіла за співвідношеннями теорії пружності, є швидкості поширення акустичних ультразвукових (УЗ) коливань різного типу, зокрема поздовжніх (l) та поперечних (t). Для визначення швидкостей поширення таких хвиль використовується іммерсійний метод, який дозволяє за один прийом виміряти значення поздовжньої (v_l) та поперечної (v_t) хвиль.

Аналіз останніх публікацій

Іммерсійний метод вимірювань швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль в запропонований в ряді робіт [1–6] і ґрунтується на проходженні УЗ-хвиль через зразок, занурений у рідину. В роботі [7] аналізуються переваги та недоліки іммерсійної техніки і вказується на можливість реєстрації параметрів пружних коливань, що створюються у досліджуваному об'єкті, при гідростатичному навантаженні.

Умова хорошого акустичного контакту між рідиною і зразком, як правило, виконується автоматично. Це дає змогу вважати зразок еквівалентним відрізком визначеної довжини, навантаженим на обох його кінцях на опір, рівний

хвильовому опору рідини. При достатньо великому коефіцієнті затухання УЗ-хвиль в зразку можна розділити прямий і відбитий сигнал, якщо виключити можливість виникнення стоячих хвиль [1, 4–5]. Якщо затухання у зразку недостатнє для того щоб виключити вплив відбивань у всередині зразка, то потрібно розділяти в часі прямий і відбитий сигнали. При цьому кількість вкладених по товщині зразка довжини хвиль внаслідок інтерференції падаючої і відбитої хвиль та хвиль, що пройшли через зразок, визначає коефіцієнти відбивання та прозорості.

В роботах [8–10] визначенні механічні характеристики матеріалів на основі швидкостей поширення ультразвукових коливань.

Дослідження процесів відбивання і прозорості акустичних хвиль через пластину проведені в роботах [11–13] для матеріалів із додатнім значенням коефіцієнта Пуассона (ν) не розглядають випадки з $\nu < 0$.

Мета дослідження. Провести розрахунок коефіцієнтів відбивання та прозорості для пластини, зануреної у рідину, в залежності від кута падіння УЗ-хвилі та коефіцієнта Пуассона матеріалу. Визначити товщини пластини при максимальних значеннях коефіцієнтів відбивання та прозорості, коли у зразку поширюється тільки поперечна хвиля.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо пластину товщиною h , що роз-

міщена між двома рідкими середовищами з однаковими параметрами (ρ_1, v_1). Нехай на поверхню пластини з одного із півпросторів падає акустична хвиля під деяким кутом θ (рис. 1). На межі поділу рідина – тверде тіло виконується закон Снеліуса [1]:

$$\frac{\sin \theta}{v_1} = \frac{\sin \theta_l}{v_l} = \frac{\sin \theta_t}{v_t}, \quad (1)$$

де θ_l – кут між напрямком поширення поздовжньої хвилі в пластині і перпендикуляром в точку падіння, θ_t – кут між напрямком поширення поперечної хвилі в пластині і перпендикуляром в точку падіння.

Коефіцієнти відбивання (V) та прозорості (W) в такому випадку визначаються наступним чином [12]:

$$V = \frac{i(N^2 - M^2 - 1)}{2M + i(N^2 - M^2 + 1)}; \quad (2)$$

$$W = \frac{2N}{2M + i(N^2 - M^2 + 1)}, \quad (3)$$

$$\text{де } N = \frac{Z_{2l} \cos^2 2\theta_t}{Z_1 \sin P} + \frac{Z_{2t} \sin^2 2\theta_t}{Z_1 \sin Q},$$

$$M = \frac{Z_{2l}}{Z_1} \cos^2 2\theta_t \operatorname{ctg} P + \frac{Z_{2t}}{Z_1} \sin^2 2\theta_t \operatorname{ctg} Q;$$

$$Z_1 = \frac{\rho_1 v_1}{\cos \theta}; \quad Z_{2l} = \frac{\rho_2 v_l}{\cos \theta_l}; \quad Z_{2t} = \frac{\rho_2 v_t}{\cos \theta_t};$$

$$P = \frac{\omega h}{v_l} \cos \theta_l; \quad Q = \frac{\omega h}{v_t} \cos \theta_t;$$

ω – циклічна частота ультразвукової хвилі.

Якщо кут θ не перевищує кутів повного внутрішнього відбивання на межі рідина – тверде тіло для поздовжніх та поперечних хвиль, то величини M і N є дійсними і для коефіцієнтів відбивання та прозорості за енергією хвилі отримаємо:

$$|V|^2 = \frac{(N^2 - M^2 - 1)^2}{4M^2 + (N^2 - M^2 + 1)^2}; \quad (4)$$

$$|W|^2 = \frac{4N^2}{4M^2 + (N^2 - M^2 + 1)^2}. \quad (5)$$

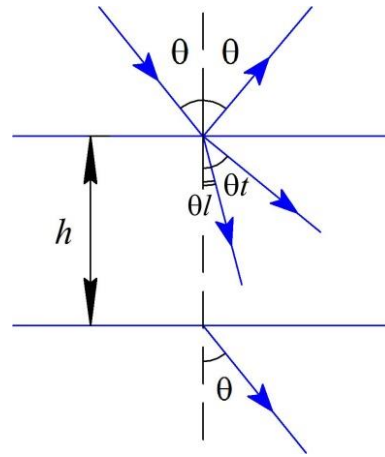


Рисунок 1—Схема відбивання і заломлення акустичних хвиль в пластині

Результати та обговорення.

Теоретичні розрахунки за співвідношеннями (4) та (5) проведені для різних полімерних матеріалів: полівінілхлориду (ПВХ) та термопластичного поліуретану (ТПУ), коефіцієнт Пуассона яких відрізняється величиною та знаком. Параметри полімерних матеріалів представлені в табл. 1. Модельною рідиною слугувало силіконове масло ПФМС – 4 ($\rho_1 = 1005,74 \text{ кг/м}^3$, $v_1 = 1395 \text{ м/с}$), що використовується як імерсійна рідина в експериментальній установці при вимірюваннях швидкостей поширення поздовжніх та поперечних хвиль в твердих тілах [5].

Коефіцієнт Пуассона при відомих швидкостях поширення v_l та v_t визначається за співвідношенням [14]:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (6)$$

Аналіз отриманих результатів вказує на неоднозначний характер проходження акустичної хвилі через полімерну пластину із різним значенням величини ν в залежності від кута падіння θ . На діаграмах чітко виражені максимуми і мінімуми величин $|V|^2$ і $|W|^2$ при різних кутах і товщинах пластини (рис. 2 – рис. 5)

Таблиця 1 – Параметри полімерних матеріалів

Матеріал	$\rho_2, \text{кг/м}^3$	$v_l, \text{м/с}$	$v_t, \text{м/с}$	ν
ПВХ	1397	2310	1100	0,35
ТПУ	1107	1635	1415	– 1

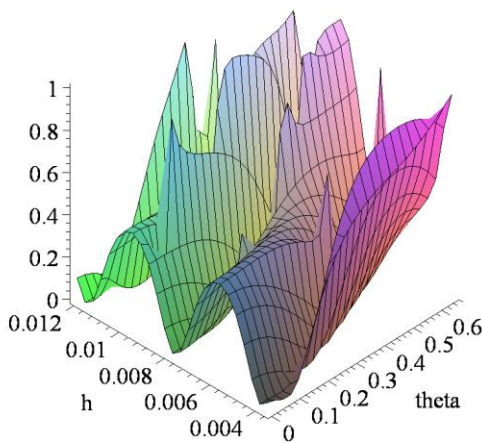


Рисунок 2—Залежність величини $|V|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини h для ПВХ

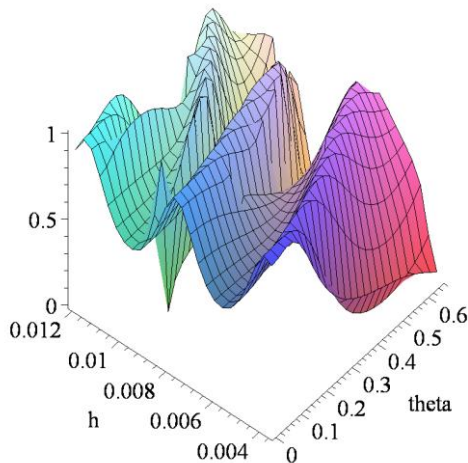


Рисунок 3—Залежність величини $|W|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини h для ПВХ

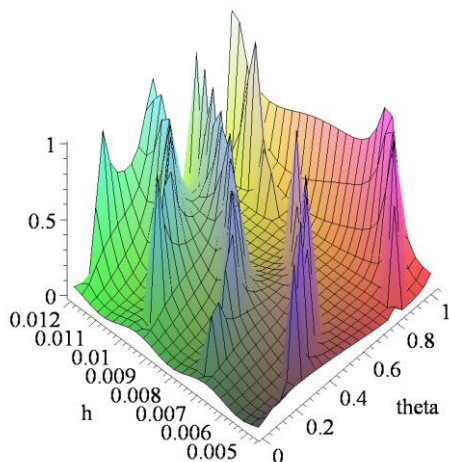


Рисунок 4—Залежність величини $|V|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини h для ТПУ

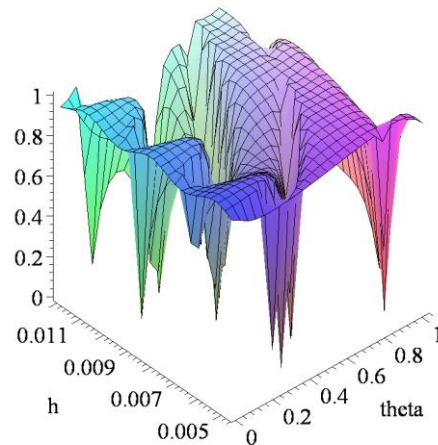


Рисунок 5—Залежність величини $|W|^2$ від кута падіння θ та товщини пластини h для ТПУ

Повне відбивання ($|V|^2 = 1$) при критичному куті $\theta_{кр}$ буде спостерігатися тоді, коли на шляху проходження поперечної УЗ-хвилі $\lambda_t / \cos \theta_t$ вкладається непарне число півхвиль. Товщину пластини в такому випадку можна визначити із співвідношення [12]:

$$h = \frac{(2n+1)\lambda_t}{2 \cos \theta_t}, \quad (7)$$

де $\lambda_t = 2\pi v_t / \omega$; $n = 0, 1, 2, \dots$.

Критичний кут падіння на межі рідина – тверде тіло визначається із співвідношення

$$\theta_{кр} = \arcsin \left(\frac{v_1}{v_l} \right). \quad (8)$$

Повну прозорість ($|W|^2 = 1$) пластини при проходженні акустичних УЗ-хвиль отримаємо за умови [12]

$$\rho_2 \omega h = 2Z_{2t} \operatorname{tg}^2 2\theta_t \operatorname{tg} \left(\frac{Q}{2} \right). \quad (9)$$

Теоретичні оцінки за співвідношенням (7) показують, що для ПВХ, при $\omega = 600$ КГц і $\theta_{кр} = 37,2^\circ$, товщини пластин рівні 2,1 та 6,31 мм, а для ТПУ, при $\theta_{кр} = 58,6^\circ$, відповідно, 4,63 та 13,88 мм.

Чисельний розв'язок рівняння (9) показує, що повна прозорість для зразка ПВХ при $\theta_{кр}$ буде при h рівних 5,9 та 10,3 мм, а для зразка ТПУ при $\theta_{кр}$, відповідно, 12,85 мм.

Величина критичного кута визначається відношенням швидкостей поширення поздовжніх хвиль у рідині і полімерному матеріалі. При зменшенні коефіцієнта Пуассона ν , швидкість v_l у

полімерах, як правило, зменшується. Відповідно, значення $\theta_{кр}$ зростає і збільшується товщина пластини h , при якій можливе повне відбивання або повне проходження для падаючої хвилі.

Так для повного відбивання приймаємо два значення h як для ПВХ так і ТПУ. Наступні розрахункові значення товщин пластини не відповідають геометричним параметрам модельного зразка матеріалу для експериментальних досліджень.

Відповідно, при повному проходженні поперечної хвилі в пластині, для ПВХ приймаємо два значення h , а для ТПУ – одне значення.

Окремо слід відмітити, що не кожна поперечна хвиля в пластині може відповідати повному проходженню акустичної хвилі через пластину. Поперечні хвилі в пластині, зміщення яких паралельні межі пластини, не зможуть трансформуватися в акустичну хвилю у рідині. Інші вільні хвилі в пластині можуть відповідати прозорості лише при комплексних кутах падіння акустичної хвилі.

Висновки

Теоретичні розрахунки параметрів моделі проходження акустичних УЗ-хвиль через пластину, занурену у рідину, можуть слугувати основою для визначення пружних параметрів за допомогою імерсійного методу при кутах повного відбивання і повної прозорості.

Список використаних джерел

1. Физическая акустика / Под ред. У. Мезон. Т. I. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
2. Ginzl E. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials / E. Ginnzel, B. Turnbull. – Режим доступу: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzl.pdf.
3. ASTM E494, Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials, ASTM Annual book of standard. – 2016. – V. 03.03. – Режим доступу: www.astm.org/BOOKSTORE/BOS/TOCS_2016/03.03.html.
4. Ohara Y. Detection of Internal Micro Defects Using Water Immersion / Y. Ohara, K Kawashima / Japanese Journal of Applied Physics. – 2004. – V. 43, – N. 5B. – P. 3119–3120.
5. Мащенко В. А. Експериментальна установка для вимірювання пружних параметрів гірських порід / В. А. Мащенко, О. О. Панчук, І. О. Садовенко, М. А. Бордюк // Вісник інженерної академії України. – 2012. – Вип. 3–4. – С. 60–64.
6. Ishii Y. Transmission of ultrasonic waves at

oblique incidence to composite laminates with spring-type interlayer interfaces / Y. Ishii, S. Biwa // J. Acoust. Soc. Am. – 2015. – V.138. – N. 5. – P. 2800–2810.

7. Булах І. О. Аналіз методів не руйнуючої дефектоскопії виробів з композиційних матеріалів / І. О. Булах, О. В. Глоба // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2013. – № 2 (65). – С. 36–42.

8. Pedersen P. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Second Edition Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. – CRC Press, 2014.

9. Buiochi F. Ultrasonic Characterization of Anisotropic Materials / F. Buiochi, M. Andrade, N. Perez, J. Adamowski // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – V. 2. – P. 65–81.

10. Rokhlin S. I. Physical Ultrasonics of Composites / S. I. Rokhlin, D. E. Chimenti, P. B. Nagy. – Oxford University Press, New York, 2011. – P. 225–368.

11. Schoch A. Der Schalldurchgang durch Platten / A. Schoch // Acustica. – 1952. – B. 2. – H. 1. – S. 1–17.

12. Бреховский Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховский. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

13. Губайдуллин А. А. Компьютерное моделирование волновых процессов в пористых средах / А. А. Губайдуллин, О. Ю. Болдырева // Вестник кибернетики. – 2016. – № 2. – С. 103–111.

14. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1985. – 245 с.

References

1. Physical Acoustics / Ed W. Mason. T. I. – М.: Mir, 1966. – 592 с.
2. Ginzl E. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials / E. Ginnzel, B. Turnbull. – Режим доступу: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzl.pdf.
3. ASTM E494, Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials, ASTM Annual book of standard. – 2016. – V. 03.03. – Режим доступу: www.astm.org/BOOKSTORE/BOS/TOCS_2016/03.03.html.
4. Ohara Y. Detection of Internal Micro Defects Using Water Immersion / Y. Ohara, K Kawashima / Japanese Journal of Applied Physics – 2004. – V. 43, – N. 5B. – P. 3119–3120.
5. Mashchenko V. A. Experimental device for measuring the elastic parameters of rocks /

V. A. Mashchenko, O.O. Panchuk, I.O. Sadovenko, M. A. Borduk // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine, – 2012. Iss. 3–4, P. 60–64.

6. Ishii Y. Transmission of ultrasonic waves at oblique incidence to composite laminates with spring-type interlayer interfaces / Y. Ishii, S. Biwa // J. Acoust. Soc. Am. – 2015. – V.138. – N. 5. – P. 2800–2810.

7. Bulakh I. O. The analysis of methods of non-destructive flaw detection of the products from composite materials / I. O. Bulakh, O. V. Hloba // Visnyk of Chernihiv State Technological University. – 2013. – N 2 (65). – P. 36–42.

8. Pedersen P. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Second Edition Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. – CRC Press, 2014.

9. Buiochi F. Ultrasonic Characterization of Anisotropic Materials / F. Buiochi, M. Andrade,

N. Perez, J. Adamowski // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – V. 2. – P. 65–81.

10. Rokhlin S. I. Physical Ultrasonics of Composites / S. I. Rokhlin, D. E. Chimenti, P. B. Nagy. – Oxford University Press, New York, 2011. – P. 225–368.

11. Schoch A. Der Schalldurchgang durch Platten / A. Schoch // Acustica. – 1952. – B. 2. – H. 1. – S. 1–17.

12. Brehovsky L. M. Waves in layered media / L. M. Brehovsky. – M.: Nauka, 1973. – 343 p.

13. Gubaidullin A. A. Computer modeling of wave processes in porous media / A. A. Gubaidullin O. Yu. Boldyreva // Proceedings in cybernetic. – 2016. – N 2. – P. 103–111.

14. Landau L. D. Theory of Elasticity / L. D. Landau, E. M. Lifshitz. – M.: Nauka, 1985. – 245 p.

Надійшла до редакції 27.10.2018

УДК 534.111

Л. В. Коломієць¹, д.т.н., О. М. Лимаренко², к.т.н.

¹Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

²Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

КОМП'ЮТЕРНИЙ ТА НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ ПРИЧАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА

У роботі розглянуто підхід до оцінки залишкового ресурсу вантажопідійомних машин, що знаходяться тривалий час в експлуатації, на базі математичного моделювання з використанням методу скінченних елементів для визначення полів напружень та виявлення найбільш небезпечних зон. Для отримання реальних навантажень, що виникають в металоконструкціях перевантажувачів проведено натурний експеримент шляхом використання тензометрії при максимально можливому їх навантаженні з подальшим порівнянням отриманих даних з розрахунковими. На підставі отриманих результатів зроблені висновки про поточний стан металоконструкцій окремої вантажопідійомної машини та про умови можливості подальшої експлуатації металоконструкції розглянутих причальних контейнерних перевантажувачів. Визначено ресурс роботи крану.

Ключові слова: підйомно-транспортна машина, метод скінченних елементів, експеримент натурний, експеримент комп'ютерний, напруження, деформації, розрахунок, вимірювання.

Л. В. Коломиец, д.т.н., А. М. Лимаренко, к.т.н.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ МЕТАЛОКОНСТРУКЦИИ ПРИЧАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ

В работе рассмотрен подход к оценке остаточного ресурса грузоподъемных машин, находящихся длительное время в эксплуатации, на базе математического моделирования с использованием метода конечных элементов для определения полей напряжений и выявления наиболее опасных зон. Для получения реальных нагрузок, возникающих в металлоконструкциях перегружателей проведен натурный эксперимент путем использования тензометрии при максимально возможном их нагружении с последующим сравнением полученных данных с расчетными. На основании полученных результатов сделаны выводы о текущем состоянии металлоконструкций отдельной грузоподъемной

машины и об условиях возможности дальнейшей эксплуатации металлоконструкции рассмотренных причальных контейнерных перегружателей. Определен ресурс работы крана.

Ключевые слова: подъемно-транспортная машина, метод конечных элементов, эксперимент натурный, эксперимент компьютерный, напряжения, деформации, расчет, измерение.

L. V. Kolomiets, DSc, O. M. Lymarenko, PhD

COMPUTER AND NATURAL EXPERIMENT IN DETERMINATION OF STRESSES AND DEFORMATIONS OF METAL STRUCTURES

In this work, an approach to estimating the residual life of load-lifting machines that have been in operation for a long time, using mathematical modeling using the finite element method to determine stress fields and identify the most dangerous zones, was considered. The analysis shows that the average age of cranes is outside the allowed limits. The issue of updating the fleet of lifting machines and technical re-equipment of industrial enterprises requires time and large capital expenditures. The purchase of new crane equipment raises the question of its cost, design and manufacture time, methods of its transportation to the destination, installation, its settings and other current problems, implies a long waiting time and significant capital costs.

Recently, methods and technologies have been introduced into engineering practice, which allow today, at relatively low cost, to significantly increase the operational resource of the existing load-lifting machinery fleet.

The development of modern technology can significantly reduce the wear and destruction of elements of metal structures of crane equipment and their mechanisms, by establishing frequency control, was not available in this form in previous years.

To obtain real loads arising in the metal structures of the loaders, a full-scale experiment was carried out by using strain gauges at the maximum possible load and then comparing the obtained data with the calculated ones. The research methods are mathematical, a full-scale experiment and statistical.

The conclusions about the current state of the metal structures of the individual lifting machine and about the conditions for the possibility of further operation of the metal structures of these control panels were drawn based on the obtained results. (Based on the results obtained, conclusions were drawn about the current state of the metal structures of the individual lifting machine and about the conditions for the possibility of further operation of the metal structures of these control panels.) The approach to solving this problem can be applied to most types of lifting machines in operation.

Key words: hoisting (lifting?) machine, finite element method, full-scale experiment, computer experiment, stresses, deformations, calculation, measurement.

[DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-32-41](https://doi.org/10.32684/2412-5288-2018-2-13-32-41)

Постановка проблеми. Різке скорочення надходження нових кранів в Україні за останню чверть століття призвело до того, що промислові підприємства опинилися в дуже складному становищі: зношення парку вантажопідіймальних кранів досягло 90 %; економічне становище портів країни в цілому унеможливило придбання нових кранів. Аналіз стану показує, що середній вік кранів знаходиться за межами дозволених норм.

Питання відновлення парку вантажопідіймних машин та технічного переозброєння промислових підприємств вимагає часу і великих капітальних витрат. Придбання нового кранового обладнання викликає питання про його вартість, терміни конструювання та виготовлення, способи його транспортування до місця призначення, монтаж, його налаштування та інші поточні проблеми, що передбачає тривалий час очікування

та значні капітальні витрати.

Останнім часом в інженерну практику впроваджуються методи та технології, які дозволяють вже сьогодні при відносно невеликих витратах істотно збільшити експлуатаційний ресурс наявного парку вантажопідіймних машин.

Розвиток сучасної техніки дозволяє значно скоротити зношування та руйнування елементів металлоконструкцій кранового обладнання та їх механізмів, шляхом встановлення частотного управління, яке не було доступним в такому вигляді в попередні роки.

Питання аналізу стану, перевірки та вдосконалення існуючого кранового обладнання, в першу чергу, ставить задачу про визначення реального стану металлоконструкції, причини руйнування металлоконструкції, визначення способів реконструкції досліджуваної металлоконструкції, які дали б можливість надалі використати вантажо-

підйомну машину як дієву одиницю робочого процесу без значних подальших витрат на ремонт металоконструкції та кранового обладнання.

Продовження терміну безпечної експлуатації технічних пристроїв здійснюється на основі оцінки їх індивідуального технічного стану. Такий підхід використовується зараз в цивільній авіації, в енергетиці, важкій і гірничодобувній промисловості, в практиці експлуатації автомобілів, будівельно-дорожніх машин та сільськогосподарської техніки.

Методологія прогнозування індивідуального ресурсу роботи та інших індивідуальних показників надійності не відрізняється від методології прогнозування на стадії проектування.

У загальному випадку стан підйомно-транспортної машини оцінюється з точки зору міцності, статичної і тривалої (багато- та малоциклової втоми), зносу, крихкого руйнування, водневого та корозійного розтріскування, корозії та ін.

При цьому розрахунки повинні, згідно зі стандартними методиками, мати експериментальну перевірку. Важливо відзначити і той факт, що стандартна документація не регламентує спосіб оцінки залишкового ресурсу.

Як правило, при оцінці залишкового ресурсу обмежуються перевіркою статичної міцності металоконструкції та розрахунком на опір.

Слід також зауважити, що ці розрахунки, як правило, виконуються з тими або іншими спрощеннями.

Розглянемо існуючі, найбільш поширені методики розрахунку залишкового ресурсу конструкцій та зробимо їх оцінку з точки зору можливості застосування до реальної вантажопідйомної машини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Науковому обґрунтуванню питань числового аналізу та методів дослідження міцності, жорсткості та надійності кранових конструкцій присвячені роботи науковців Баженова В. А., Бычкова Д. В., Григор'єва М. І., Кузнечного Б. С., V. Shastry, G. V. Rao. Роботи авторів Бузуна І. Н., Городецького А. С., Москвичової Л. Ф. присвячені визначенню та аналізу несучої системи металевих конструкцій з використанням систем САПР та сучасного обладнання.

Більшість програм для проведення комп'ютерного експерименту побудовано на використанні математичного апарату методу скінченних елементів (МСЕ).

Відомо [1-5], що конструктивні елементи всіх підйомно-транспортних машин мають свою міцнісну та жорсткісну попередню історію, яку

важко переоцінити, особливо кранів, які знаходяться в експлуатації десятки років. Доведено, що величина деформацій та напружень, що фіксують в матеріалі, перевищує допустиму похибку лінійних розмірів та кутових деформацій [1, 3, 4]. Тобто сучасні дослідження металоконструкцій повинні проводитись з раціональним використанням числового та фізичного експериментів, та проводити визначення механічних параметрів як натурними, так і комп'ютерними методами для забезпечення експлуатації підйомно-транспортних машин без ушкоджень [6-10].

Мета дослідження. Провести аналіз технологічного процесу перевантаження вантажів, що обробляються та плануються переробляти за допомогою причального контейнерного перевантажувача (ПКП), та визначити фактичний стан металевих конструкцій для ПКП. Розглянути існуючі, найбільш поширені методики розрахунку залишкового ресурсу конструкцій. Виконати типові розрахунки за нормальним напруженням. Розробити математичну модель розглянутої металоконструкції крана за допомогою системи рівнянь методу скінченних елементів. За допомогою комп'ютерної реалізації чисельного методу розрахунку МСЕ провести комп'ютерний експеримент та розглянути конструкцію ПКП при різних варіантах навантаження, а також визначити небезпечні перерізи та області для проведення натурального експерименту. Для натурального експерименту застосувати метод тензометрії, який є одним з найбільш ефективних методів експериментального визначення полів деформацій та напружень в натурних конструкціях. Визначити залишковий ресурс роботи металоконструкції підйомно-транспортної машини.

Викладання основного матеріалу. Для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) металоконструкції вантажопідйомних машин використовують аналітичні, чисельні та експериментальні методи.

Аналітичний метод призначений для визначення НДС стрижневих конструкцій, базується на принципах будівельної механіки, опору матеріалів і в більшості випадків використовує гіпотезу плоских перетинів.

Цей метод використовується для попередніх та проектувальних розрахунків, необхідних для вибору габаритних розмірів поперечного перерізу елементів металоконструкції.

Розв'язання ж складних завдань аналітичним методом досить важке, а при складній конфігурації геометрії досліджуваних елементів металоконструкції, навіть неможливе, тому, що пов'язане з розв'язанням диференціальних рівнянь теорії пружності. Основними перевагами

цього методу є можливість аналізу впливу окремих елементів на отриманий результат, можливість знаходження оптимального розв'язання.

Чисельний метод визначення НДС в основному проводиться методом скінченних елементів, який дозволяє вести розрахунок елементів зі складною конфігурацією та видами навантажень. За необхідності може бути облік нелінійності (геометричної, фізичної).

Ринок програмних продуктів, які використовують MCE, представлений такими програмами для складних розрахунків, як ABAQUS, ANSYS, RoboBAT, MSC / Nastran, Lira, Scad та ін.

Експериментальний метод визначення НДС використовується в умовах значної невизначеності, тобто коли не вистачає даних для попередньої оцінки реальних сил, що діють на ПКП або для перевірки обліку всіх сил при розрахунку чисельними методами.

Експериментальний метод дає найкращий результат в поєднанні з аналітичними або чисельними методами. Так при використанні, наприклад, первинних перетворювачів (тензорезисторів) для експериментального визначення деформацій (навантажень) металоконструкції, ми можемо визначити їх величину лише дискретно: у точках наклепки первинних перетворювачів (датчики опору – тензорезистори).

У свою чергу чисельний метод або комп'ютерний експеримент дадуть безперервні поля деформацій та навантажень по всьому розглянутому елементу.

Виходячи з розглянутих існуючих методів визначення НДС конструкцій, скористаємося чисельним методом.

У практиці конструювання вантажопідійомних машин не все навантаження є такими, що обчислюються. Частина з них визначається за емпіричними формулами (наприклад, зусилля від реборди колеса з головою рейки), а їх значення може лежати в досить широких діапазонах. У зв'язку з вищевикладеним, для перевірки відповідності розрахункової моделі ПКП його реальних умов навантаження, використовується експериментальний метод.

При коректно побудованій розрахунковій моделі, граничних умовах та прикладених навантаженнях необхідно, щоб дані про НДС, отримані чисельним та експериментальним методом збігалися в межах інженерної похибки.

На початковому етапі дослідження мета розрахунку не саме визначення НДС, а знаходження небезпечних місць металоконструкції ПКП (прольотної будови), які можуть бути осередками деформацій і руйнування. В подальшому в цих місцях будуть проводитися заміри параметрів

напружено-деформованого стану та за ними буде зроблено висновок про стан металоконструкції ПКП.

В роботі використовується математичний апарат механіки деформованого твердого тіла та основні залежності теорії пружності.

Звід основних рівнянь механіки – це сукупність трьох груп рівнянь: статичних, геометричних та фізичних:

1. Рівняння статики.

У цю групу входять диференціальні рівняння рівноваги всередині тіла (рівняння Нав'є):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0; \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Та умови на поверхні (статичні граничні умови):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n - \bar{X} &= 0; \\ \tau_{yx} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n - \bar{Y} &= 0; \\ \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n - \bar{Z} &= 0; \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де X, Y, Z – об'ємні сили;

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ – сили на поверхні.

2. Геометричні рівняння.

Це рівняння Коші, які встановлюють зв'язок між деформаціями та переміщеннями:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}; \\ \epsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}; \\ \epsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z}; \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

Та рівняння спільності деформацій, які часто називають тотожністю Сен-Венана:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= \frac{2\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= \frac{2\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= \frac{2\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \right\} \quad 4)$$

3. Фізичні рівняння.

Це рівняння узагальненого закону Гука в прямій формі:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)], \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

або у формі Ляме (зворотна форма):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2G\varepsilon_x + \lambda\Delta, \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \\ \sigma_y &= 2G\varepsilon_y + \lambda\Delta, \quad \tau_{xz} = G\gamma_{xz}; \\ \sigma_z &= 2G\varepsilon_z + \lambda\Delta, \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\text{де } \Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad \lambda = \frac{2\mu G}{1 - 2\mu}.$$

Стосовно використання методу скінченних елементів можна виділити два етапи дослідження конструкції: на першому етапі виконується декомпозиція вихідної системи на кінцеві елементи та вивчається поведінка кожного елемента, а на другому етапі виконується синтез системи рівнянь для описання досліджуваного об'єкту.

На першому етапі скінченно-елементної апроксимації виводяться залежності між силами і переміщеннями на границі елемента через залежності між силами і переміщеннями всередині окремого елемента.

Другий етап полягає у використанні залежностей між параметрами елементів на їхніх гра-

никах для побудови системи рівнянь, що описують поведінку всієї конструкції.

В існуючих на сьогоднішній день програмах виконання цих етапів є автоматизованим, але не є автоматичним. Необхідний діалог користувача з програмою, потрібні додаткові математичні моделі досліджуваних об'єктів і нові програмні процедури, що органічно поєднуються з використанням пакетом.

Математична модель розглянутої металоко-нструкції крана описується системою рівнянь

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1,3n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2,3n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3,3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{3n,1} & k_{3n,2} & k_{3n,3} & \dots & k_{3n,3n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \\ \vdots \\ U_n \\ V_n \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_1 \\ F_1 \\ \vdots \\ F_n \\ F_n \\ F_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

або

$$\bar{K} \bar{U} = \bar{F}, \quad (8)$$

де k_{ij} – матриця жорсткості кінцевого елемента в локальній системі координат;

F_i – навантаження, прикладене до вузла з позначкою i моделі;

U_i, V_i, W_i – переміщення в вузлі з позначкою i за трьома взаємно перпендикулярними напрямками;

$\bar{K}$ – глобальна матриця жорсткості.

Визначення граничних умов (навантаження та закріплення), що використовуються при розрахунку металоко-нструкції ПКП.

Геометрія моделі

Моделювання всієї металоко-нструкції ПКП виконано на основі робочих креслень наданих замовником.

Побудована модель апроксимована балочними кінцевими елементами. Геометрія балкових елементів визначалася становищем центрів тяжіння поперечних перерізів елементів ПКП. Для апроксимації обраний стандартний кінцевий елемент з бібліотеки програм розрахункової базатоцільової програми – Beam 189 (рис. 1).

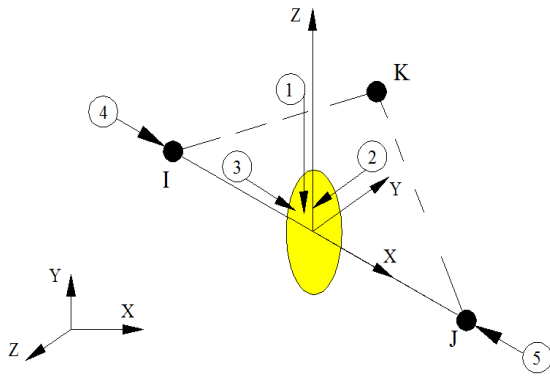


Рисунок 1 – Скінченний елемент Beam 189

Елемент має шість ступенів свободи в кожному вузлі – переміщення в напрямках осей X , Y , Z вузлової системи координат та кути поворотів навколо цих осей.

Побудована кінцево-елементна модель несучої системи ПКП, яка складається з 862 елементів та 1045 вузлів. При розбитті на кінцеві елементи використано впорядковану побудову сітки скінчених елементів. Для побудови моделі балочними елементами сформовано 32 оригінальних поперечних перерізи, у відповідності з особливостями конструкції, а також 27 стандартних поперечних перерізів з бібліотеки програми кінцево-елементного аналізу.

Для імітації закріплень в точках шарнірних з'єднань елементів ПКП використовувався масовий елемент MASS21. Це точковий елемент, який має шість ступенів свободи – три лінійних переміщення та три кути повороту, а також нульову масу (рис. 2).

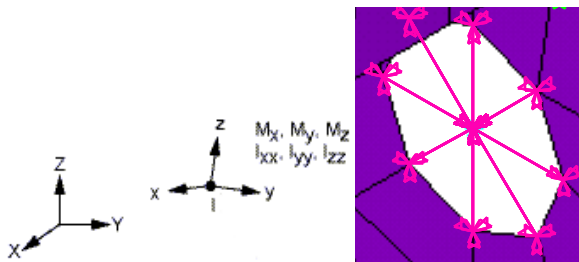


Рисунок 2 – Точковий елемент MASS21

Граничні умови

При розрахунку металевих конструкцій враховують всі діючі на них навантаження, а саме:

- постійні й рухливі;
- вітрові;
- навантаження від крутіння.

До постійних навантажень відносяться:

- вага металоконструкції ПКП;

– вага частин ПКП, пов'язаних з металоконструкцією.

Навантаження від ваги конструкції приймається розподіленим по довжині несучих елементів, а навантаження від ваги частин ПКП пов'язаних з металоконструкцією, приймаються як зосереджені сили.

Допустимі навантаження приймаються в залежності від розрахункової комбінації і від марки сталі, з якої виготовлена металоконструкція.

У нашому випадку для сталі 09 Г 2 С-12 – $[\sigma] = 180 \text{ МПа}$.

На основі аналізу реальної конструкції контейнерного перевантажувача, в розрахунковій схемі основу закріплено шарнірно, а також за допомогою шарнірів з'єднано складові несучої системи.

Програма що реалізує МСЕ дозволяє в результаті розрахунків отримати практично всі необхідні параметри напружено-деформованого стану (НДС) конструкції: напруження та деформації в напрямках координатних осей, головне напруження і відповідні деформації, еквівалентні напруження за гіпотезою Губера-Мізеса, переміщення всіх точок конструкції та цілий ряд інших величин.

В роботі проведені розрахунки різних варіантів навантаження металоконструкції ПКП та отримані необхідні для аналізу міцності і жорсткості параметри.

Для розрахункової моделі використано випадок, якому відповідають максимальні навантаження робочого стану (рис. 3 – 6).

Сюди входять:

- вагові навантаження від номінального вантажу;
- вага металоконструкції;
- максимальні навантаження від тиску вітру;
- інерційні навантаження від відхилення вантажу від вертикалі;
- навантаження, викликані перекосом крана в процесі роботи;
- навантаження від позакентрового положення кабіни оператора.

Результати комп'ютерного експерименту наведені на рисунках 4 – 6. Вантажний візок з боку моря (між відтяжкою і кінцевим перерізом) на консольній частині.

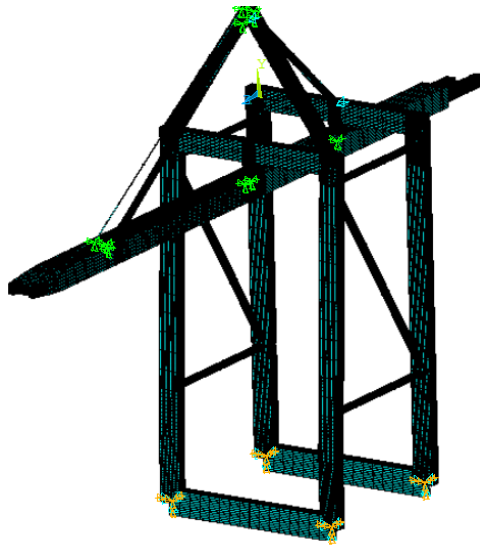


Рисунок 3 – Математична модель причального контейнерного перевантажувача

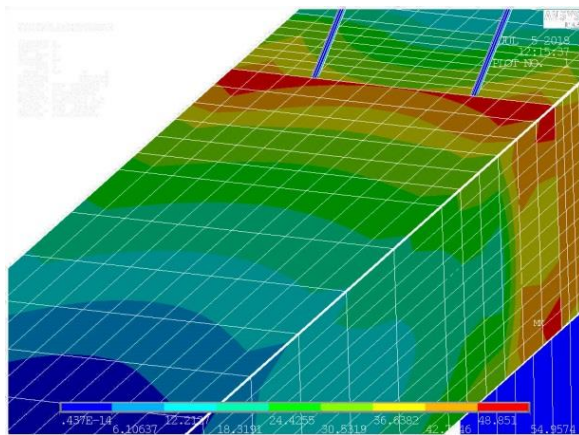


Рисунок 4 – Еквівалентні напруження в стрілі ПКП

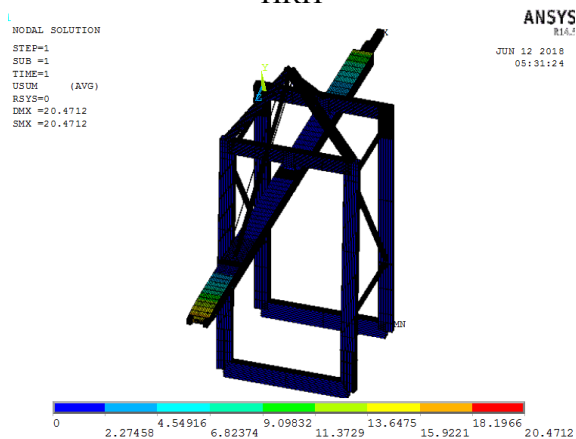


Рисунок 5 – Сумарні переміщення в металоконструкції порталу.

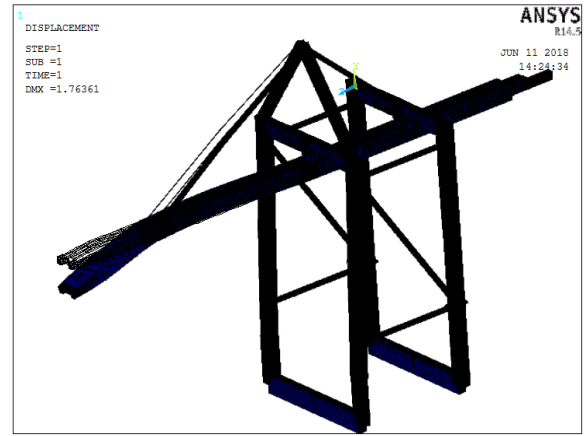


Рисунок 6 – Деформована форма металоконструкції ПКП (збільшений масштаб деформації)

Визначення параметрів напружено-деформованого стану дозволило визначити найбільш небезпечні ділянки в металоконструкції ПКП та, відповідно, точки розташування тензодатчиків опору для проведення натурного експерименту.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновок, що досліджувана модель крана працездатна, тому, що отримані значення параметрів напружено-деформованого стану знаходяться в допустимих межах.

Найбільші напруження виникають в характерних перерізах прольотної будови (стріла та тилова частина).

За допомогою комп'ютерної реалізації чисельного методу розрахунку МСЕ вдалося провести комп'ютерний експеримент та розглянути конструкцію ПКП при різних варіантах навантаження, а також визначити місця небезпечних перерізів для проведення натурного експерименту.

Результати експерименту та розрахунку зведені в таблицю 1.

Похибка результатів чисельного та експериментального дослідження небезпечних точок металоконструкції ПКП знаходиться в межах інженерної похибки 5 %, що свідчить про коректний вибір граничних умов і методики дослідження.

Використовуючи дані числового та натурного експериментів, визначаємо залишковий ресурс роботи металоконструкції ПКП.

Необхідні дані про попередню експлуатацію крана, представлені замовником.

Таблиця 1 – Порівняння абсолютних значень напружень

Точка	Датчик	Нормальні напруження за даними розрахунку МСЕ, МПа	Нормальні напруження за даними натурного експерименту ПКП, МПа
1	5	50,0341	46,9
	6	4,8546	4,6
	7	6,7669	6,46
2	8	36,4202	34,86
	9	2,3427	2,2
	10	17,5643	16,8
3	11	38,7679	36,8
	12	6,3324	6,1
	13	22,3529	21,2
4	14	26,6867	24,97
	15	4,3321	4,3
	16	5,3415	5,1

ПКП – кран експлуатується 29 років.

Число робочих циклів за час роботи перевантажувача визначається за формулою

$$N = T \cdot \tau \cdot t \cdot n = 8,874 \cdot 10^5 \text{ циклів,} \quad (9)$$

де $T = 29$ – кількість років роботи;

$\tau = 170$ – кількість робочих днів в році;

$t = 10$ – кількість годин роботи на добу;

$n = 18$ – кількість робочих циклів в годину.

Згідно ISO 4301/1 та ГОСТ 25546-82 клас використання перевантажувача відповідає С6.

Фактичний клас навантаження відповідно до ISO 4301/1 та ГОСТ 25546-82 розраховується за формулою (6.27):

$$Kp = \sum \left[C_i / C_T (P_i / P_{\max})^3 \right], \quad (10)$$

$$Kp = 0,347.$$

У відповідності з ISO 4301/1 та ГОСТ 25546-82 при класі навантаження Q3 та класі використання С6 група режиму роботи перевантажувача буде 7К; А7.

Відповідно до довідки про характер роботи ПКП – середня маса одного підйому 19,39 тонн.

Розрахунок залишкового ресурсу металоко-нструкції перевантажувача (ПКП) відповідно до умов експлуатації крана:

$$\Phi = \frac{N_1}{N_{\text{год}}} \cdot K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}} \cdot K_{\text{ср}}, \text{ роки} \quad (11)$$

де $N_1 = (N - N_{\text{нар}}) \cdot \lambda \cdot K_{\text{н}} = 4,673 \cdot 10^5$ – циклів;

$N = 2 \cdot 10^6$ – середній ресурс в циклах навантаження;

$N_{\text{ф}} = 8,874 \cdot 10^5$ – розрахункове напруження крана в циклах навантаження;

$\lambda = 0,7$ – коефіцієнт періоду зародження тріщини;

$K_{\text{н}} = 0,6$ – коефіцієнт нерегулярності навантаження металоко-нструкції

$T = 3,33$ – тривалість роботи крана в хв.,

$D_k = 365$ – кількість календарних днів в році;

$k = 0,42$ – коефіцієнт використання крана за часом;

$K_{\Pi} = 0,8$ – коефіцієнт ушкодження металоко-нструкції; $K_{\text{д}} = 0,8$ – коефіцієнт динамічного навантаження металоко-нструкції; $K_{\text{ср}} = 0,9$ – коефіцієнт агресивності середовища експлуатації крана.

Залишковий ресурс для металоко-нструкції крана ПКП – $\Phi = 8,72$ роки, за умови збереження поточного режиму експлуатації ПКП.

За кривої втомі [6] визначимо число циклів до руйнування вузла в зоні найбільших еквівалентних напружень (з'єднання відтягнення і стріли) при фактичних умовах навантаження ПКП $\sigma_{\text{Е}}^{\text{МІЗЕС}} = 46,1 \text{ МПа}$:

$$(\sigma_{\text{Е}}^{\text{МІЗЕС}})^m \cdot N_2 = \sigma_{-1\text{К}} \cdot N_0, \quad (12)$$

де N_2 – число циклів до руйнування.

Число циклів до руйнування:

$$N_2 = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1\text{К}}}{\sigma_{\text{Е}}^{\text{МІЗЕС}}} \right)^m = 308505,75 \text{ циклів.} \quad (13)$$

Кількість циклів роботи крана для постійної регулярної інтенсивної роботи крана $N_{\text{К}} = 2 \cdot 10^5$ циклів.

Визначимо число циклів до руйнування вузла з'єднання відтягнення і стріли при фактичних напруженнях:

$$N_1 = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1K}}{\sigma_{ekv}^{Mizes}} \right)^m = 15,8 \cdot 10^5 \text{ циклів.} \quad (14)$$

За 29 років роботи ПКП було напрацьовано кількість циклів $N = 8,874 \cdot 10^5$.

Для визначення залишкового ресурсу металокопункції крана скористаємося лінійною гіпотезою накопичення пошкоджень.

Визначимо ресурс металокопункції крана при роботі з підвищеними напруженнями:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2 + n_p}{N_2} = 1, \quad (15)$$

$$n_p = \left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot N_2 - n_2 = 107026,9 \text{ циклів,}$$

де n_p – ресурс металокопункції, цикли.

При підвищеному навантаженні на кран ресурс експлуатації випадку складе 6,12 років.

Ресурс роботи крану з фактичним навантаженням:

$$\frac{n_1 + n_p}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1, \quad (16)$$

$$n_p = \left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot N_2 - n_2 = 158372,2146$$

При заданих умовах експлуатації залишковий ресурс остаточно складе 8,72 роки.

Висновки

Підхід до вирішення даного завдання може бути застосований до більшості типів вантажопідіймальних машин, що знаходяться в експлуатації в різних галузях народного господарства України.

В роботі проведено аналіз технологічного процесу перевантаження вантажів, що обробляються за допомогою ПКП. Визначено фактичний стан металевих копункцій ПКП. Розглянуто існуючі, найбільш поширені методики розрахунку залишкового ресурсу копункцій. Виконано типові розрахунки за нормальними напруженнями. Розроблено комп'ютерну модель металокопункції крана за допомогою математичного апарату методу скінчених елементів. Проведено комп'ютерний експеримент та розглянуто копункцію ПКП при різних варіантах навантаження, а також визначено небезпечні перерізи та області для проведення натурного експерименту. Для натурного експерименту застосовано метод тензометрії, який є одним з найбільш ефективних методів експериментального визначення полів деформацій та напружень в натурних копунк-

ціях. Визначено залишковий ресурс роботи металокопункції підйомно-транспортної машини.

Список використаних джерел

1. Калініченко П. М. Напружений стан товстостінного циліндра з концентраторами / П. М. Калініченко, О. М. Лимаренко, Ю. В. Зяблов // Праці Одеського політехнічного університету. – 2006. – № 2(26). – С. 20 – 23.
2. Оробей В. Ф. Применение численных методов к расчету элементов судовых конструкций / В. Ф. Оробей, А. О. Немчук, А. М. Лимаренко // Вісн. Одес. нац. морського ун-ту. – 2009. – № 26. – С. 85–90.
3. Кравчук В.С. Влияние конструктивно-технологических факторов на коэффициент запаса прочности поверхностно-упрочненных деталей машин / В. С. Кравчук, А. М. Лимаренко // Праці Одеського політехнічного університету. – 2006. – № 1 (25). – С. 14–17.
4. Limarenko A. M. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Druzhynin // Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 51, ч. 1. – С. 586–589.
5. Лимаренко А. М. Методика расчета рулевого управления с применением модуля программы Solid Works / А. М. Лимаренко, В. В. Хамрай А.А. Дашенко // Материали 9 международной научно-практической конференции «Современные исследования и развитие», Болгария, София, 2015. – Том 16. – С. 11-13.
6. Баженов В. А. Численные методы в механике / В. А. Баженов, А. Ф. Дашенко, Л. В. Коломиец, В. Ф. Оробей, Н. Г. Сурьянинов. – Одесса: «Стандартъ», 2005. – 564 с.
7. Оробей В. Ф. Расчет арок на устойчивость методом граничных элементов / В. Ф. Оробей, А. Ф. Дашенко, А. М. Лимаренко // Проблеми техніки. – Одеса, 2009. – № 2. – С. 114–123.
8. Orobej V. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures [Text] / V. Orobej, L. Kolomiets, A. Lymarenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 295–302.
9. Orobej V. Mathematical modeling of the stressed-deformed state of circular arches of specialized cranes[Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko, Y. Ovcharov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 5/8(89). – P. 4–11.
10. Orobej V. Stability of structural elements of special lifting mechanisms in the form of circular arches[Text] / V. Orobej, O. Daschenko,

L. Kolomiets, O. Lymarenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 2/7(92). – P. 4–10.

References

1. Kalinichenko P. M. Napruzhenyi stan tovstostinnoho tsylindra z kontsentratoramy / P. M. Kalinichenko, O. M. Lymarenko, Yu. V. Ziablov // Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu. – 2006. – # 2(26). – S. 20 – 23.
2. Orobej V. F. Primenenie chislennykh metodov k raschetu e'lementov sudovyx konstrukcij / V. F. Orobej, A. O. Nemchuk, A. M. Limarenko // Visn. Odes. nats. morskoho un-tu. – 2009. – № 26. – S. 85–90.
3. Kravchuk V.S. Effect of constructive and technological factors on stock Factor prochnosty surface-uprochneniya machine parts / V.S. Kravchuk A. M. Limarenko // Proceedings Odessa Polytechnic University. – 2006. – № 1 (25). – S. 14–17.
4. Limarenko A.M. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Druzhynin // Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury. – 2015. – Vyp. 51, ch. 1. – S. 586–589.
5. Limarenko A.M. Metodika rascheta rulevogo upravleniya s primeneniem modulay programy Solid Works. / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Dashchenko // Materialy 9 megdunarodnoy

nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye issledovaniya i razvitiye», Bolgaria, Sofia, 2015. – Tom 16. – S. 11-13.

6. Bazhenov V. A. Chislennyye metody v mexanike / V. A. Bazhenov, A. F. Dashhenko, L. V. Kolomiec, V. F. Orobej, N. G. Sur'yaninov. – Odessa: “Standart”, 2005. – 564 s.

7. Orobej V. F. Raschet arok na ustojchivost' metodom granichnykh e'lementov / V. F. Orobej, A. F. Dashhenko, A. M. Limarenko // Problemy tekhniki. – Odesa, 2009. – # 2. – S. 114–123.

8. Orobej V. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures [Text] / V. Orobej, L. Kolomiets, A. Lymarenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 295–302.

9. Orobej V. Mathematical modeling of the stressed-deformed state of circular arches of specialized cranes [Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko, Y. Ovcharov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 5/8(89). – P. 4–11.

10. Orobej V. Stability of structural elements of special lifting mechanisms in the form of circular arches[Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 2/7(92). – P. 4–10.

Надійшла до редакції 15.07.2018

РОЗДІЛ 3

Інформаційно-вимірювальні системи і технології

УДК 004.415+658:621.56

С. Л. Волков, к.т.н., С. Д. Асabahшвілі, С. В. Коломієць

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

**МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ
ПРОМИСЛОВИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ**

У статті представлена множинна модель оцінки якості життєвого циклу промислових кіберфізичних систем які є базою створення і еволюції Індустрії 4.0. Модель є подальшим розвитком моделі структури показників якості життєвого циклу складних об'єктів і визначає уніфіковану структуру для кількісної оцінки якості системи як складової Системи систем, на протязі її життєвого циклу визначеного dual-V процесною моделлю. Узагальнено множинне визначення моделі життєвого циклу Системи систем. На базі визначень і еталонної моделі згідно стандартів серії ISO 25000 наведено графічну структуру моделі показників якості. Запропоновані математичні вирази і графічні структури вимірювання і оцінки якості життєвого циклу досліджуваної системи.

Ключові слова: кіберфізична система, оцінка якості, життєвий цикл, уніфікована структура оцінки якості, dual-V процесна модель.

С. Л. Волков, к.т.н., С. Д. Асabahшвили, С. В. Коломиец

**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
ПРОМЫШЛЕННЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В статье представлена множественная модель оценки качества жизненного цикла промышленных киберфизических систем которые являются базой создания и эволюции Индустрии 4.0. Модель является дальнейшим развитием модели структуры показателей качества жизненного цикла сложных объектов и определяет унифицированную структуру для количественной оценки качества системы как составляющей Системы систем, на протяжении ее жизненного цикла определенного dual-V процессной моделью. Дано множественное определение модели жизненного цикла Системы систем. На базе определений и эталонной модели данных в стандартах серии ISO 25000 приведена графическая структура модели показателей качества. Предложены математические выражения и графические структуры измерения и оценки качества жизненного цикла исследуемой системы.

Ключевые слова: киберфизическая система, оценка качества, жизненный цикл, унифицированная структура оценки качества, dual-V процессная модель.

S. L. Volkov, PhD., S. D. Asabashvili, S. V. Kolomiets

**THE MODEL OF QUALITY EVALUATION OF THE LIFECYCLE OF INDUSTRY
CYBERPHYSICAL SYSTEMS**

In the article the set of models of quality evaluation of the lifecycle of the cyberphysical systems, which are the basis for building and evolution of the Industry 4.0 is presented. The model is the next development of structure of quality indicators of the lifecycle of difficult objects and defines the unified structure for quantitative assessment of quality of systems, which are parts of the System of systems, throughout whole its lifecycle, which is defined by dual-V process model. In the study the set-theoretical definition of the quality model of the lifecycle of the System of systems is generalized. Based on the definitions and reference model, which are given in family of standards ISO 25000, the hierarchical structure of the model of quality indicators and math model of quality evaluation is built. The generalized expressions for quantitative assessment of complex quality indicators of the lifecycles and phases of the cyberphysical system as a part of the System of systems are offered. The expressions for quantitation of quality indicators of the processes of validation and confirmation according to the model of inner and outer quality and quality during usage are offered. The decomposition of the process V-model of quality of the generalized process of the lifecycle is done and the analysis of the phases of the processes as objects of the lowest level is executed. The expressions for quantitation of complex quality indicators of the lifecycle and the process phases are offered. The graphical visualization of the mathematical model of quality evaluation of the lifecycle of the cyberphysical systems is given, integration phases and validation (CQM verification and validation), phases of development and determination (CQM lowest configuration items), phases of development and determination (CQM processes). The mathematical model of quality evaluation of the lifecycle, which is received as a result of the research, gives the possibility of automated building of the general tree of quality of the System of systems and subtrees of quality of the explored cyberphysical system and its subsystems.

Keywords: The system of systems, cyberphysical system, quality evaluation, lifecycle, unified structure of quantity assessment of quality, process dual-V model.

Вступ. Парадигма Четвертої промислової революції старт якої було дано на Гановерському ярмарку 2016 року, перш за все має на увазі підвищення якості промислових кіберфізичних систем, які є її базовою складовою [1].

В роботі [2] було запропоновано процесну модель якості складних об'єктів яка визначає структуру показників якості (ПЯ) життєвого циклу (ЖЦ), однак не містить механізму для їх оцінювання. Саме такий механізм забезпечить цілісність моделі структури показників якості і дозволить застосувати методи автоматизованої побудови дерева властивостей якості [3], [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні засади оцінки стану кіберфізичної системи були закладені в роботі [1]. Дослідження розвинені в [2] та [5], де отримана процесна модель якості ЖЦ штучного об'єкта. Визначення показників якості та еталонна модель вимірювання якості запропоновані в стандартах [6], [7], [8]. Застосування стандартів для оцінки якості систем і методи автоматичної побудови дерева якості досліджено в [9], [10], [3], [4].

Метою роботи є розробка моделі уніфікованої структури оцінки якості кіберфізичних систем які ґрунтуються на dual-V процесній моделі якості ЖЦ Системи систем складовою якої є

досліджувана система.

Виклад основного матеріалу з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Звернемося до дослідження в [2], а саме до множинного визначення dual-V процесної моделі ЖЦ Системи систем структурною складовою якої є кіберфізична система (CPS). Узагальнення наведеного в роботі визначення може бути представлено виразом 1.

Відповідно еталонної моделі вимірювання якості, ДСТУ ISO/IEC 25010:2015, ДСТУ ISO/IEC 25020:2016, та ДСТУ ISO/IEC 25021:2016 [6], [7], [8], [9] значення властивостей якості визначаються як функція вимірювання елементів показників якості (ЕПЯ, QME) – показників визначених в термінах властивості та методах вимірювання, включаючи математичне перетворення для кількісного визначення цієї властивості відносно прийнятої шкали. Показник якості одної властивості називається простим показником якості (ППЯ, SQM). Показник якості, який об'єднує кілька простих показників, називається комплексним показником якості (КПЯ, SQM).

Структура моделі показників якості у вигляді дерева ПЯ яке відповідає еталонній моделі та [10] наведена на рис. 1.

$$\begin{aligned}
 \{Q_{LC_{SoS}}\} &= \left\{ \bigcup_{LC_{Sys}} \left\{ \bigcup_{LC_{Proc}} \left\{ \bigcup_{LC_{SubSys}} \left\{ \bigcup_{LC_{Proc}} \left\{ \bigcup_{LC_{LCI}} \left\{ \bigcup_{LC_{Proc}} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} = \\
 &= \left\{ \bigcup_{a=1} \left\{ \bigcup_b \left\{ \bigcup_{a+1} \left\{ \bigcup_b \left\{ \bigcup_c \left\{ \bigcup_d \left\{ \bigcup_{PrLC_{abcd}} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \left\{ Q_{Verif_{ab}}, Q_{Valid_{ab}} \right\}, \\
 &\quad \left\{ \bigcup_c \left\{ \bigcup_d \left\{ \bigcup_{PrLC_{(a+1)bcd}} \right\} \right\} \right\} \right\}, \\
 &\quad \left\{ Q_{Verif_{(a+1)b}}, Q_{Valid_{(a+1)b}} \right\}, \\
 &\quad \dots, \\
 &\quad \left\{ \bigcup_{|a|} \left\{ \bigcup_b \left\{ \bigcup_c \left\{ \bigcup_d \left\{ \bigcup_{PrLC_{|a|bcd}} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \left\{ Q_{Verif_{|a|b}}, Q_{Valid_{|a|b}} \right\} \right\}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

де $Q_{LC_{SoS}}$ – якість Системи систем, $Q_{LC_{Sys}}$ – якість CPS, $Q_{LC_{SubSys}}$, $Q_{LC_{LCI}}$, $Q_{LC_{Proc}}$ – якість підсистем, елементів нижчого рівня та процесів, відповідно; Q_{PrLC} – множина показників якості фази процесу; Q_{Verif} – якість

перевіряння; Q_{Valid} – якість затвердження; a – індекс рівня системи в dual-V процесної моделі якості ЖЦ, b – індекс фази ЖЦ системи, c – індекс ЖЦ процесу фази системи, d – індекс фази процесу.

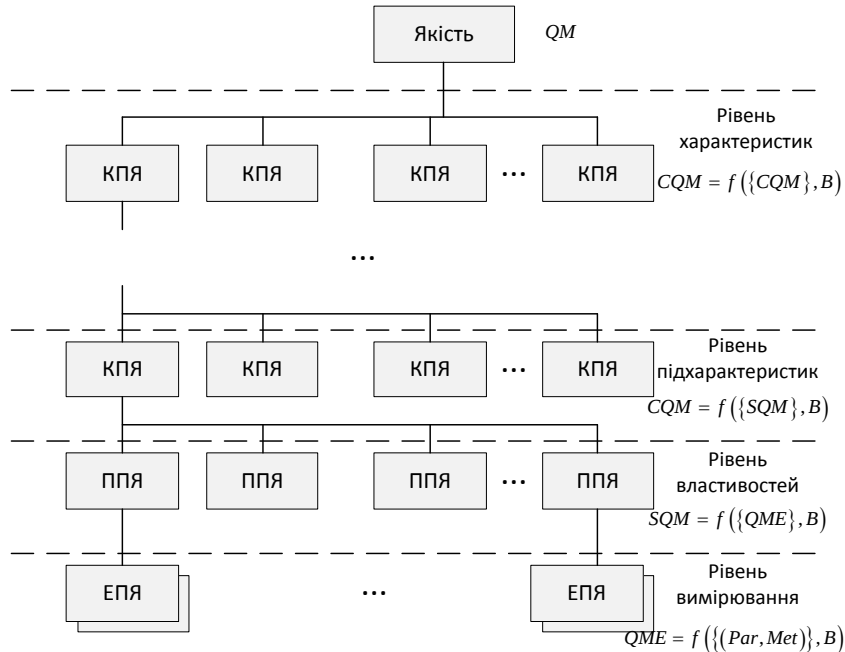


Рисунок 1 – Структура моделі показників якості

Математична модель вимірювання якості вигляд: згідно еталонної та структурної моделей має

$$QM = f\left(f\left(\{(Par, Met), B\}\right), f\left(\{QME, B\}\right), f\left(\{SQM, B\}\right), f\left(\{CQM, B\}\right)\right), \quad (2)$$

де QM – комплексний показник якості CPS (корінь дерева ПЯ); $\{CQM\}$ – множина комплексних показників якості рівня (множини вузлів рівнів підхарактеристик і характеристик дерева

$$ПЯ) \begin{cases} CQM_{(|l|-2)} = f(\{SQM\}, B) \\ CQM_{(|l|-3)} = f(\{CQM_{(|l|-2)}\}, B); \{SQM\} - \\ \dots \\ CQM_1 = f(\{CQM_2\}, B) \end{cases}$$

множина простих показників якості (множина вузлів рівня властивостей) $SQM = f(\{QME\}, B)$; $\{QME\}$ – множина елементів показників якості (множина листя рівня вимірювання) $QME = f(\{(Par, Met)\}, B)$; $\{(Par, Met)\}$ – множина кортежів (параметрів і методів) вимірювання;

$B = \{b_1, \dots, b_i, \dots, b_{|Q_l|}\}$ – характеристичний вектор відповідних множин ($Q_l \subset Q_{l-1} | \forall Q_{lx} \in Q_l, b_i = 1$), Q_l – множина ПЯ довільного рівня, x – індекси ПЯ на відповідному рівні; $l = (1:|l|)$ – індекс рівня, $|l|$ – рівень листя, $(|l|-1)$ – рівень ППЯ, $(1:(|l|-2))$ – рівні КПЯ.

Позначимо кількісні значення якості означених вище структурних елементів через $QM_{LC_{Sys}}$, $QM_{LC_{SubSys}}$, $QM_{LC_{LCI}}$, $QM_{LC_{Proc}}$ і у відповідності до (1, 2), рис. 1 та [2] кількісне значення Q_{LC} представимо функцію:

$$QM_{LC} = f(\{QM_{PhLC}\}), \quad (3)$$

де QM_{PhLC} – КПЯ узагальненої фази V-

моделі якості ЖЦ системи.

В свою чергу згідно (1, 2):

$$QM_PhLC = f \left(\begin{matrix} QM_Verif, QM_Valid, \\ QM_LC_{Proc}, QM_LC_{SubSys} \end{matrix} \right), \quad (4)$$

де QM_Verif – КПЯ перевіряння фази, QM_Valid – КПЯ підсистем які відносяться до фази (систем нижнього рівня);
 QM_LC_{Proc} – КПЯ процесів фази, QM_LC_{SubSys}

$$\begin{aligned} QM_Verif &= f \left(\begin{matrix} f(\{(Par, Met), B\})_{Verif}, f(\{QME, B\})_{Verif}, \\ f(\{SQM, B\})_{Verif}, f(\{CQM, B\})_{Verif} \end{matrix} \right), \\ QM_Valid &= f \left(\begin{matrix} f(\{(Par, Met), B\})_{Valid}, f(\{QME, B\})_{Valid}, \\ f(\{SQM, B\})_{Valid}, f(\{CQM, B\})_{Valid} \end{matrix} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де структури показників якості перевіряння Q_Verif та затвердження Q_Valid відповідають моделям внутрішньої і зовнішньої якості, а на стадії експлуатації також і моделі якості при використанні [6], [7], [8].

Згідно декомпозиції процесної V-моделі якості ЖЦ процесу [5], [2] та (1), оскільки рівень процесів є об'єктом самого нижнього рівня, множини

$$\left\{ \bigcup_c \left\{ \bigcup_d Q_PrLC_{abcd} \right\} \right\} = \phi, \quad \{Q_LC_{(a+1)b}\} = \phi$$

отримаємо:

$$Q_LC_{proc} = \bigcup_b \{Q_PrLC_b\},$$

де b – індекс фази процесу.

Узагальнюючи і переходячи до кількісних визначень:

$$\begin{aligned} QM_LC_{Proc} &= f(\{QM_PrLC\}) \\ QM_PrLC &= f(\{(QM_Verif), (QM_Valid)\}) \end{aligned} \quad (6)$$

де QM_PrLC – КПЯ узагальненої фази V-моделі якості ЖЦ процесу, QM_Verif та QM_Valid розраховуються за виразом (5).

КПЯ підсистем QM_LC_{SubSys} та систем нижчого рівня QM_LC_{LCI} (як підсистем підсистеми) розраховуються за виразами (3 – 6) як і КПЯ узагальненої системи.

Візуалізація математичної моделі оцінки якості життєвого циклу CPS (3 – 6) наведена на рис. 2 – рис. 5.

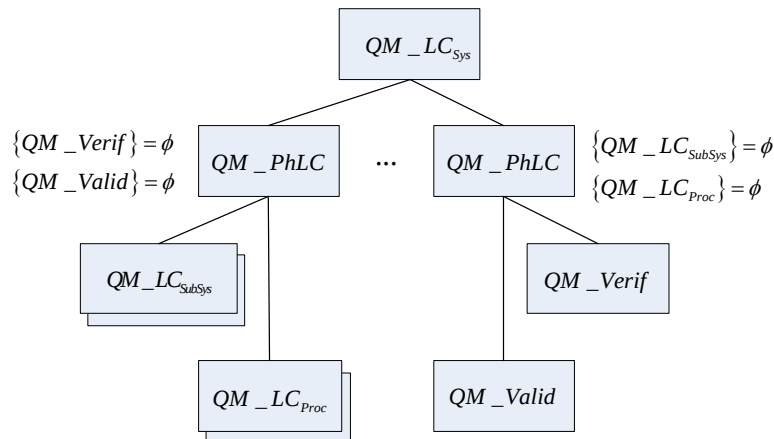


Рисунок 2 – Візуалізація математичної моделі оцінки якості життєвого циклу системи

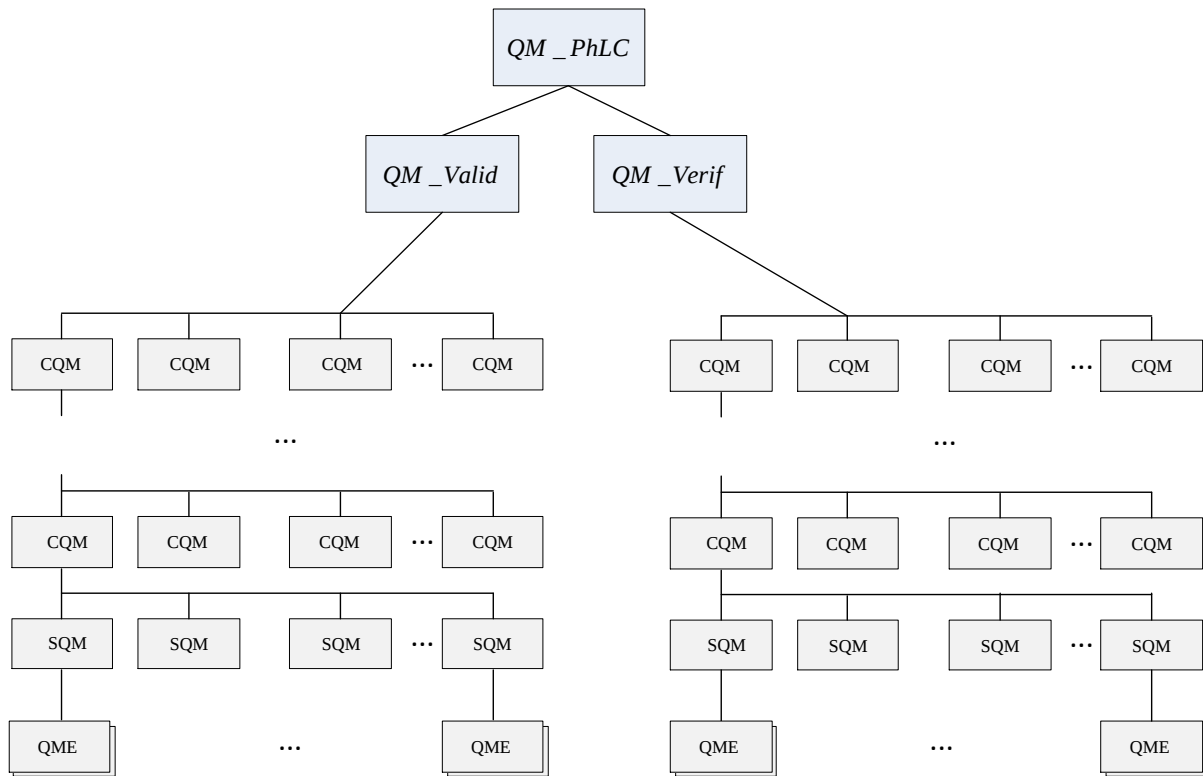


Рисунок 3 – Візуалізація математичної моделі оцінки якості життєвого циклу фаз інтеграції та перевірення (КПЯ перевірення і затвердження)

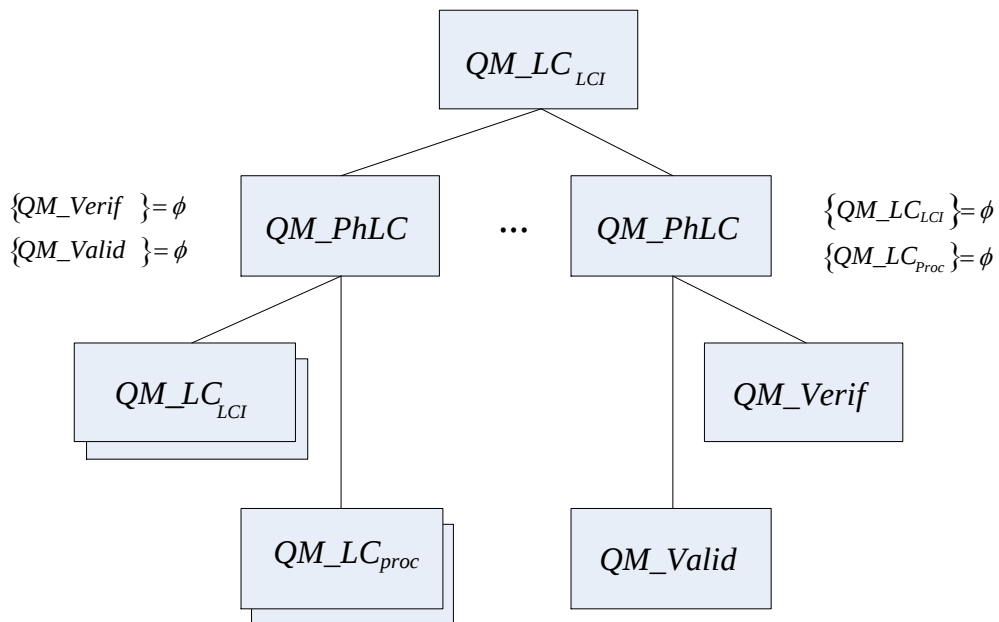


Рисунок 4 – Візуалізація математичної моделі оцінки якості життєвого циклу фаз розробки та визначення (КПЯ систем нижчого рівня)

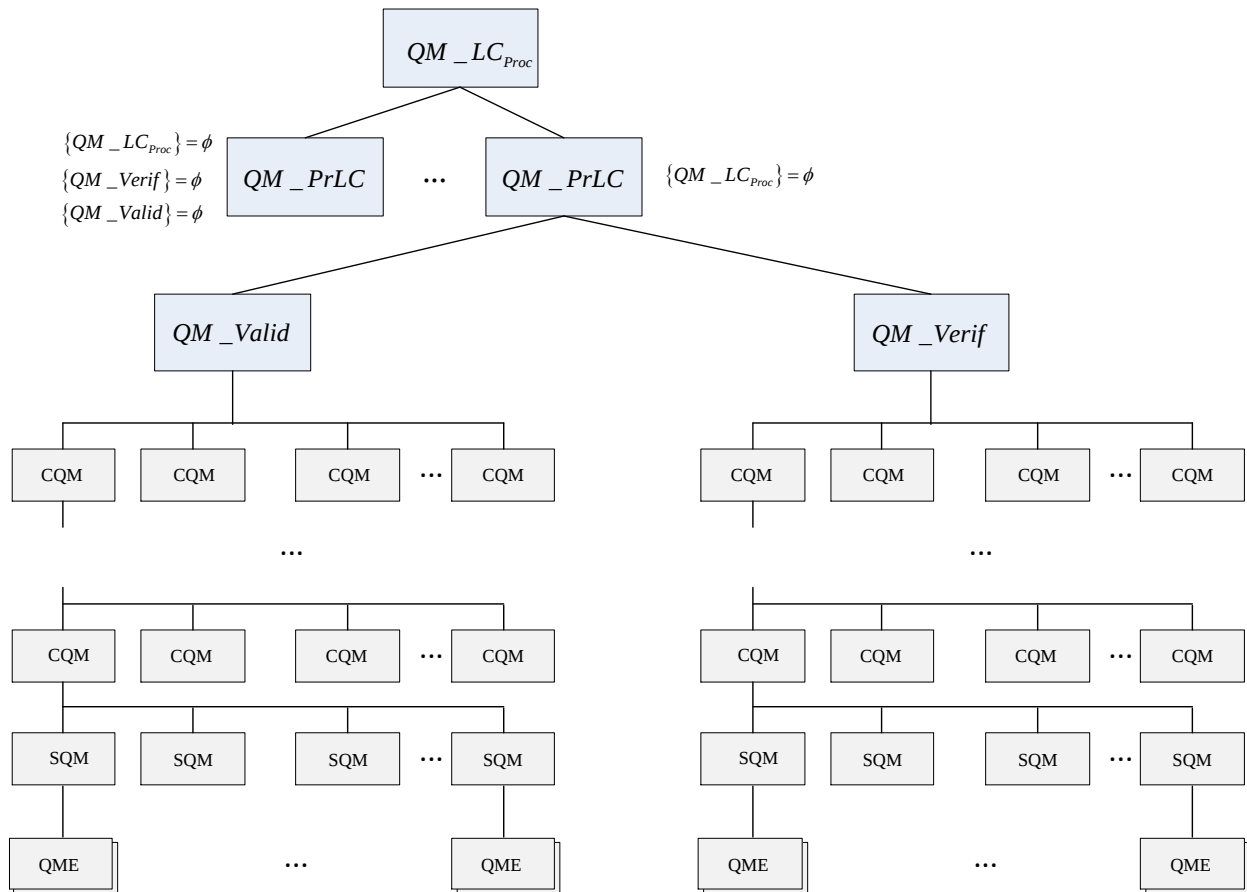


Рисунок 5 – Візуалізація математичної моделі оцінки якості життєвого циклу фаз розробки та визначення (КПЯ процесів)

Висновки

Запропонована в роботі математична модель оцінки якості є подальшим розвитком моделі структури показників якості життєвого циклу складних об'єктів. Модель визначає уніфіковану структуру для кількісної оцінки якості кіберфізичної системи як складової Системи систем, на протязі її життєвого циклу визначеного dual-V процесною моделлю. Отримана в результаті проведених досліджень математична модель оцінки якості життєвого циклу дає змогу автоматизованої побудови загального дерева якості Системи систем та піддерев якості досліджуваної кіберфізичної системи і її підсистем.

Список використаних джерел

1. Волков С. Л. Теоретичні засади побудови моделі структури експертної системи якості кіберфізичних систем / Збірник наукових праць 6-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи» (Одеса, 11-12 жовтня). – Одеса: ОДАТРЯ. – 2016. – С. 139–141.
2. Волков С. Л. Dual-v процесна модель якості штучного об'єкту / С. Л. Волков,

О. І. Кисельова // Метрологія та прилади (спец-випуск до 100 річчя П. П. Орнатського). – № 6. – 2017. – С. 62–65.

3. Грабовський О. В. Філогенетична модель побудови дерева властивостей показників якості / О. В. Грабовський // Вісник інженерної академії України. – № 1. – 2013. – С. 225–228.

4. Вавілов Є. В. Модель двійкового методу деревоподібної кластеризації властивостей якості інформаційної системи / Є. В. Вавілов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – № 6(40). – С. 78–85.

5. Волков С. Л. Системна модель процесу життєвого циклу штучних систем / С. Л. Волков, Є. В. Вавілов, С. В. Коломієць // Збірник наук. праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2017. – Вип. 1(10). – С. 83–86.

6. ДСТУ ISO/IEC 25010:2015 Інженерія програмних засобів і систем. Вимоги щодо якості та оцінювання систем і програмного продукту (SQuaRE). Моделі якості системи та програмних засобів (ISO/IEC 25010:2011, IDT).

7. ДСТУ ISO/IEC 25020:2016 Інженерія програмних засобів і систем. Вимоги щодо якості та оцінювання систем і програмного продукту

(SQuaRE). Рамкова модель і настанова щодо вимірювання (ISO/IEC 25020:2007, IDT).

8. ДСТУ ISO/IEC 25021:2016 Інженерія програмних засобів і систем. Вимоги щодо якості та оцінювання систем і програмного продукту (SQuaRE). Елементи показника якості (ISO/IEC 25021:2012, IDT).

9. Вавілов Є. В. Серія стандартів SQuaRE як основа забезпечення вимог до якості та оцінки програмних засобів / Є. В. Вавілов // Збірник наукових праць ОДАТРЯ. – Вип. 1(6). – 2015. С. 129–139.

10. Волков С. Л. Модель побудови дерева вимірювань якості інформаційної системи / С. Л. Волков, Є. В. Вавілов // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології : І міжнар. наук.-техн. конф., 17-20 листопада 2015. – ДУТ, К. – С. 23–24.

References

1. Volkov S. L. Theoretical principles of construction of the model of the structure of the expert system of quality of cyberphysical systems [Teoretychni zasady pobudovy modeli struktury ekspertnoyi systemy yakosti kiberfizychnykh system] / Collection of scientific papers of the 6th International Scientific and Practical Conference "Metrology, Technical Regulation, Quality: Achievements and Prospects" (Odessa, October 11-12). Odesa: OSATRQ, 2016. – P. 139–141.

2. Volkov S. L., Kiseleva O. I. Dual-v process model of the quality of the artificial object [Dual-v protsesna model' yakosti shtuchnoho ob'yektu] / Metrology and devices (special edition to 100th anniversary of PP Ornatsky). – 2017. – # 6. – P. 62–65.

3. Grabovsky O. V. Phylogenetic model of constructing a tree of properties of quality indices [Filo-henetychna model' pobudovy dereva vlastyvostry pokaznykiv yakosti] / Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. – 2013. – # 1. – P. 225–228.

4. Vavilov E. V. Model of the binary tree clustering method for the quality of the information sys-

tem [Model' dviykovoho metodu derevopodibnoyi klasteryzatsiyi vlastyvostry yakosti informatsiynoyi systemy] / Scientific notes of the Ukrainian Research Institute of Communication. – 2015. – № 6(40). – P. 78–85.

5. Volkov S. L., Vavilov E. V., Kolomiets S. V. System model of life cycle process of artificial systems [Systemna model' protsesu zhyttyevoho tsyklu shtuchnykh system] / Collection of scientific works of the Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality. – 2017. – # 1(10). – P. 83–86.

6. DSTU ISO / IEC 25010: 2015 Engineering of software and systems. System and Software Quality and Assessment Requirements (SQuaRE). System quality and software quality models (ISO / IEC 25010: 2011, IDT).

7. DSTU ISO / IEC 25020: 2016 Engineering of software and systems. System and Software Quality and Assessment Requirements (SQuaRE). Frame model and measurement manual (ISO / IEC 25020: 2007, IDT).

8. DSTU ISO / IEC 25021: 2016 Engineering of software and systems. System and Software Quality and Assessment Requirements (SQuaRE). Quality Score Elements (ISO / IEC 25021: 2012, IDT).

9. Vavilov E. V. A series of SQuaRE standards as a basis for ensuring quality requirements and evaluating software tools [Seriya standartiv SQuaRE yak osnova zabezpechennya vymoh do yakosti ta otsinky prohramnykh zasobiv] / Collection of scientific works of the Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality. – 2015. – # 1(6). – P. 129–139.

10. Volkov S. L., Vavilov E. V. Model of constructing a measuring system for the quality of the information system [Model' pobudovy dereva vymiryuvan' yakosti informatsiynoyi systemy] / Modern information and communication technologies: I intern. Sci.-Tech. Conf., November 17-20, 2015. DUT, K., P. 23-24.

Надійшла до редакції 13.11.2018

УДК 004.415+658:621.56

С. Л. Волков, к.т.н., **Є. В. Вавілов**, к.т.н.

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННА МОДЕЛЬ ЯКІСНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

В роботі запропоновано множинну модель якісного стану промислової кіберфізичної системи, заснованої на кваліметричній оцінці відповідності поточних показників якості датчиків її сенсорної інфраструктури, очікуваним значенням. Застосування «якісного» підходу, як універсального, тобто не пов'язаного з конкретним фізичним чи лінгвістичним значенням вимірюваної величини дає змогу оцінити вплив взаємозв'язків показників якості зовнішніх систем на поточний стан досліджуваної системи у процесі діагностування. Віднесення поточного стану датчиків сенсорної інфраструктури до певного піддіапазону шкали виконує функцію редукції складності і дає значне зниження обсягу даних для оперування. Модель надає змогу моніторингу стану у процесі затвердження в реальному часі як в умовах експлуатації, так і при тестуванні на стадіях виробництва (пусконаладжувальні роботи і дослідна експлуатація) та підтримки системи.

Ключові слова: кіберфізична система, множинна модель, оцінка якості, якісний стан, показники якості, якісний підхід, сенсорна інфраструктура.

С. Л. Волков, к.т.н., **Е. В. Вавілов**, к.т.н.

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В работе предложена множественная модель качественного состояния промышленной киберфизической системы, основанной на кваліметрической оценке соответствия текущих показателей качества датчиков ее сенсорной инфраструктуры, ожидаемым значением. Применение «качественного» подхода, как универсального, то есть не связанного с конкретным физическим или лингвистическим значением измеряемой величины позволяет оценить влияние взаимосвязей показателей качества внешних систем на текущее состояние исследуемой системы в процессе диагностирования. Отнесение текущего состояния датчиков сенсорной инфраструктуры к определенному поддиапазону шкалы выполняет функцию редукции сложности и дает значительное снижение объема данных для операции. Модель дает возможность мониторинга состояния в процессе утверждения в реальном времени как в условиях эксплуатации, так и при тестировании на стадиях производства (пусконаладочные работы и опытная эксплуатация) и поддержке системы.

Ключевые слова: киберфизическая система, множественная модель, оценка качества, качественное состояние, показатели качества, качественный подход, сенсорная инфраструктура.

S. Volkov, PhD, **E. Vavilov**, PhD

SET-THEORETICAL MODEL OF QUALITY STATE OF THE INDUSTRIAL CYBERPHYSICAL SYSTEM

In the work the set-theoretical model of quality state of the industrial cyberphysical system which is based on qualimetric evaluation of the compliance of the current quality indicators of sensors of its sensory infrastructure with the expected value. Model assignment is use in systems of monitoring and diagnostics. The model gives a possibility of building of monitoring of the state of cyberphysical systems in the process of affirmation in real time as in operating conditions as during testing at production stages (start-up and adjustment works and experimental exploitation) and system support. The main difference from existing systems based on “related models” is applying of the “quality” approach as an universal one, which is not connected with specific physical or linguistic meaning of the measured value. Quality indicators in the given expressions define the quality state of components of sensor infrastructure of the cyberphiscal system according to the ISO/IEC 25000 series of standards and correspond to the problem-oriented functional proper-

ties of quality, which determine how well the system execute its functions. Attribution of the current state of the components of the sensor infrastructure to the certain subrange of quality scale performs the function of difficulty reduction and gives a significant decline of data volume for operating in diagnostic systems. The applied methods of qualimetric measurements and evaluating are based on the entropy determination of simple and complex quality indicators of components of sensory-hardware, sensory-functional and sensory-software infrastructure. Offered approach also gives a possibility of evaluation of influence of interconnections of quality indicators of outer systems on the current state of the explored system in process of diagnostics of complicated and critical situations. Set-theoretical expressions for determination of quality state of functional blocks, hardware units, structure levels and their components are given. The graphical visualization of model of quality state of generalized sensory infrastructure and qualitative state of the functional block is given.

Keywords: cyberphysical system, set-theoretical model, quality assessment, qualitative state, quality indicators, qualitative approach, sensory infrastructure

DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-50-56

Вступ. Основою діагностування технічних, у тому числі кіберфізичних систем (КФС), є визначення їх поточного стану в реальному масштабі часу, яке полягає в зведенні і обробці великих обсягів різноманітної вимірювальної інформації для ідентифікації та інтерпретації складних подій і критичних ситуацій. Редукція складності, яка полягає в зменшенні обсягів даних для обробки є однією з актуальних завдань які стоять перед розробниками діагностичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час найбільш дієвою щодо визначення стану КФС є «пов'язана модель» яка може безперервно записувати та відслідковувати стан реальної системи. Основним недоліком такого підходу є оперування великою кількістю значень фізичних величин, та станів КФС, і, як результат – можливість моделювання і збору статистичних даних тільки на базі великих дата-центрів, і відсутність аналізу взаємозв'язків досліджуваної системи з зовнішніми системами (забезпечення та оперативне оточення) [1 – 4]. Альтернативою такого підходу є рішення пов'язані з визначенням стану досліджуваних систем заснованих на кваліметричній оцінці відповідності поточних показників якості їх складових очікуваним значенням. База альтернативи запропонована в роботах [5 – 7] представленням КФС у вигляді її сенсорної інфраструктури, а універсальний підхід до визначення якісного стану датчиків досліджено в [8, 9]. Аналіз і модель показників якості КФС, взаємозв'язки і можливий вплив якісних станів зовнішніх систем її життєвого циклу наведені в роботах [10, 11].

Мета. Метою роботи є розробка математичної моделі визначення якісного стану промислової кіберфізичної системи заснованої на її сенсорній інфраструктурі.

Виклад основного матеріалу. Звернемося до множинної моделі інформаційного стану кіберфізичної системи, визначеного її сенсорною інфраструктурою, складовими якої є сенсорно-

апаратна, сенсорно-функціональна і сенсорно-програмна інфраструктури [5 – 7]. У відповідності до [8] кількісне значення інформаційного стану довільного датчика як базової складової будь-якої сенсорної інфраструктури, відповідає кількості власної інформації його поточного стану отриманого в результаті експлуатаційного вимірювання

$$I(s_{meas}) = -\log p(s_{meas}),$$

де $(s_{meas} \in S)$ – результат вимірювання, S – алфавіт станів датчику, $p(s_{meas})$ – ймовірність прийняття датчиком стану $(S \sim s_{meas})$.

Відносне значення власної інформації стану датчика відповідає виразу:

$$I_S^\Delta = \frac{I(s_{meas})}{I(s_{exp})} = \frac{\log p(s_{meas})}{\log p(s_{exp})},$$

де $I(s_{exp}) = -\log p(s_{exp})$ – апіорне (очікуване) значення результату вимірювання яке відповідає максимальному значенню $(p(s_{exp}) \rightarrow \max |s_{exp} = M_0)$ прийнятого ймовірного розподілу, M_0 – мода розподілу. Зворотнім значенням наведеного виразу є простий показник якості (ППЯ):

$$SQM = \frac{1}{I_S^\Delta} = \frac{I(s_{exp})}{I(s_{meas})} = \frac{\log p(s_{exp})}{\log p(s_{meas})}.$$

Інформаційний стан декількох датчиків по суті і визначенню, є об'єднанням інформаційних станів окремих датчиків, зворотне значення такого об'єднання є комплексним показником яко-

сті (КПЯ) CQM_{Sen} датчиків відповідної сенсорної інфраструктури. В свою чергу зворотне значення об'єднання CQM_{Sen} , буде відповідати комплексному показнику функціонального блоку CQM_{FB} як показнику більш високого рівня [7, 9]:

$$CQM = \frac{1}{I_Z^\Delta} = \frac{\sum_z -\log(p(Z \sim z_{exp}) | \forall z_{exp} \in Z)}{\sum_z -\log(p(Z \sim z_{meas}) | \forall z_{meas} \in Z)},$$

$$CQM_{FB_{\omega}} = CQM \left\{ \begin{array}{l} CQM \left\{ (\lambda = (1: \nu)), SQM_{SenA_{\omega\lambda}} \right\}, \\ CQM \left\{ (\zeta = (1: r)), SQM_{SenF_{\omega\zeta}} \right\}, \\ CQM \left\{ (t = (1: p)), SQM_{SenP_{\omega t}} \right\} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

де SQM_{SenA} , SQM_{SenF} , SQM_{SenP} – ППЯ сенсорів відповідної інфраструктури, CQM – КПЯ складових відповідних рівнів.

де Z – довільні множини (складові) моделі сенсорної інфраструктури, z_{exp} – очікуване (апріорне) значення стану відповідної складової, z_{meas} – поточне (виміряне) значення стану відповідної складової.

Таким чином, стан функціонального блоку FB в термінах і визначеннях показників якості може бути визначений виразом:

Графічне представлення виразу (1) наведено на рис. 1.

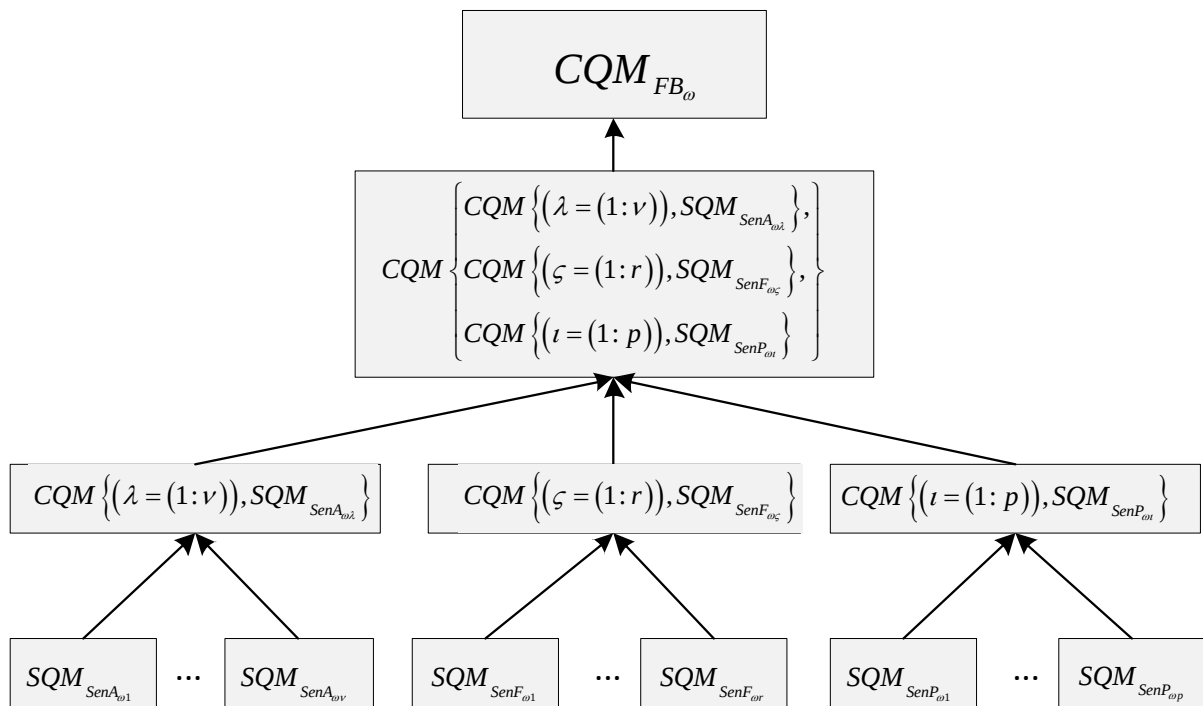


Рисунок 1 – Стан функціонального блоку FB_{ω} в термінах і визначеннях показників якості

Аналогічним чином, стан складових більш високих рівнів і самої кіберфізичної системи, сенсорна модель інформаційного стану яких дана

в [6, 7], може бути представлено в термінах і визначеннях показників якості виразами (2) і (3).

$$\begin{aligned}
 CQM_{SenSys} = & \\
 = C1 \left\{ C2 \left\{ C4 \left\{ \begin{aligned} & \left(\beta^\alpha = (1:m^\alpha) \right), CQM_{Con_{\alpha\beta^\alpha}}, \\ & \left(\beta^{\alpha-1} = (1:m^{\alpha-1}) \right), CQM_{Con_{\alpha\beta^\alpha\beta^{(\alpha-1)}}}, \\ & \dots, \left\{ C6 \left\{ \begin{aligned} & \left(\beta^1 = (1:m^1) \right), \\ & CQM_{Con_{\alpha\beta^\alpha \dots \beta^1}} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \right\} \right\} = \\
 = C1 \left\{ C2 \left\{ C3 \left\{ C4 \left\{ C5 \left\{ \begin{aligned} & \left(\beta^\alpha = (1:m^\alpha) \right), \\ & \left(\gamma^\alpha = (1:n^\alpha) \right), CQM_{Dev_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha}}, \\ & \left(\beta^{(\alpha-1)} = (1:m^{(\alpha-1)}) \right), \\ & \left(\gamma^{(\alpha-1)} = (1:n^{(\alpha-1)}) \right), \\ & CQM_{Dev_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha\beta^{(\alpha-1)}\gamma^{(\alpha-1)}}}, \\ & \dots, \left\{ C6 \left\{ \begin{aligned} & \left(\beta^1 = (1:m^1) \right), \\ & \left(\gamma^1 = (1:n^1) \right), \\ & CQM_{Dev_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha \dots \beta^1\gamma^1}} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} , \quad (2)
 \end{aligned}$$

де CQM_{SenSys} – КПА кіберфізичної системи виражений через модель сенсорної інфраструктури, CQM_x – КПА складових відповідних рівнів, α – індекс ПЯ рівня, β – індекс ПЯ складової рівня Con , γ – індекс структурних апаратних одиниць Dev складової рівня, $C \langle \cdot \rangle$ відповідає наступним ПЯ: $C1 \rightarrow CQM_\alpha$, $C2 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha}$, $C3 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha}$, $C4 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha\beta^{(\alpha-1)}}$, $C5 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha\beta^{(\alpha-1)}\gamma^{(\alpha-1)}}$, $C6 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha \dots \beta^1}$,

$C7 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha\gamma^\alpha \dots \beta^1\gamma^1}$, x – індекс відповідного рівня.

Кваліметричні вимірювання, оцінка і належність стану об'єктів з (1-3) до шкали якості здійснюється за правилами наведеними в [8, 9]. Можливість оцінки впливу зовнішніх систем на працездатність КФС забезпечується аналізом взаємозв'язків показників якості всіх складових Системи систем до складу якої входить досліджувана система [10].

1997 1997

1999 1998 1997 1996 1995 1994 1993 1992 1991 1990 1989 1988 1987 1986 1985 1984 1983 1982 1981 1980 1979 1978 1977 1976 1975 1974 1973 1972 1971 1970 1969 1968 1967 1966 1965 1964 1963 1962 1961 1960 1959 1958 1957 1956 1955 1954 1953 1952 1951 1950 1949 1948 1947 1946 1945 1944 1943 1942 1941 1940 1939 1938 1937 1936 1935 1934 1933 1932 1931 1930 1929 1928 1927 1926 1925 1924 1923 1922 1921 1920 1919 1918 1917 1916 1915 1914 1913 1912 1911 1910 1909 1908 1907 1906 1905 1904 1903 1902 1901 1900 1899 1898 1897 1896 1895 1894 1893 1892 1891 1890 1889 1888 1887 1886 1885 1884 1883 1882 1881 1880 1879 1878 1877 1876 1875 1874 1873 1872 1871 1870 1869 1868 1867 1866 1865 1864 1863 1862 1861 1860 1859 1858 1857 1856 1855 1854 1853 1852 1851 1850 1849 1848 1847 1846 1845 1844 1843 1842 1841 1840 1839 1838 1837 1836 1835 1834 1833 1832 1831 1830 1829 1828 1827 1826 1825 1824 1823 1822 1821 1820 1819 1818 1817 1816 1815 1814 1813 1812 1811 1810 1809 1808 1807 1806 1805 1804 1803 1802 1801 1800 1799 1798 1797 1796 1795 1794 1793 1792 1791 1790 1789 1788 1787 1786 1785 1784 1783 1782 1781 1780 1779 1778 1777 1776 1775 1774 1773 1772 1771 1770 1769 1768 1767 1766 1765 1764 1763 1762 1761 1760 1759 1758 1757 1756 1755 1754 1753 1752 1751 1750 1749 1748 1747 1746 1745 1744 1743 1742 1741 1740 1739 1738 1737 1736 1735 1734 1733 1732 1731 1730 1729 1728 1727 1726 1725 1724 1723 1722 1721 1720 1719 1718 1717 1716 1715 1714 1713 1712 1711 1710 1709 1708 1707 1706 1705 1704 1703 1702 1701 1700 1699 1698 1697 1696 1695 1694 1693 1692 1691 1690 1689 1688 1687 1686 1685 1684 1683 1682 1681 1680 1679 1678 1677 1676 1675 1674 1673 1672 1671 1670 1669 1668 1667 1666 1665 1664 1663 1662 1661 1660 1659 1658 1657 1656 1655 1654 1653 1652 1651 1650 1649 1648 1647 1646 1645 1644 1643 1642 1641 1640 1639 1638 1637 1636 1635 1634 1633 1632 1631 1630 1629 1628 1627 1626 1625 1624 1623 1622 1621 1620 1619 1618 1617 1616 1615 1614 1613 1612 1611 1610 1609 1608 1607 1606 1605 1604 1603 1602 1601 1600 1599 1598 1597 1596 1595 1594 1593 1592 1591 1590 1589 1588 1587 1586 1585 1584 1583 1582 1581 1580 1579 1578 1577 1576 1575 1574 1573 1572 1571 1570 1569 1568 1567 1566 1565 1564 1563 1562 1561 1560 1559 1558 1557 1556 1555 1554 1553 1552 1551 1550 1549 1548 1547 1546 1545 1544 1543 1542 1541 1540 1539 1538 1537 1536 1535 1534 1533 1532 1531 1530 1529 1528 1527 1526 1525 1524 1523 1522 1521 1520 1519 1518 1517 1516 1515 1514 1513 1512 1511 1510 1509 1508 1507 1506 1505 1504 1503 1502 1501 1500 1499 1498 1497 1496 1495 1494 1493 1492 1491 1490 1489 1488 1487 1486 1485 1484 1483 1482 1481 1480 1479 1478 1477 1476 1475 1474 1473 1472 1471 1470 1469 1468 1467 1466 1465 1464 1463 1462 1461 1460 1459 1458 1457 1456 1455 1454 1453 1452 1451 1450 1449 1448 1447 1446 1445 1444 1443 1442 1441 1440 1439 1438 1437 1436 1435 1434 1433 1432 1431 1430 1429 1428 1427 1426 1425 1424 1423 1422 1421 1420 1419 1418 1417 1416 1415 1414 1413 1412 1411 1410 1409 1408 1407 1406 1405 1404 1403 1402 1401 1400 1399 1398 1397 1396 1395 1394 1393 1392 1391 1390 1389 1388 1387 1386 1385 1384 1383 1382 1381 1380 1379 1378 1377 1376 1375 1374 1373 1372 1371 1370 1369 1368 1367 1366 1365 1364 1363 1362 1361 1360 1359 1358 1357 1356 1355 1354 1353 1352 1351 1350 1349 1348 1347 1346 1345 1344 1343 1342 1341 1340 1339 1338 1337 1336 1335 1334 1333 1332 1331 1330 1329 1328 1327 1326 1325 1324 1323 1322 1321 1320 1319 1318 1317 1316 1315 1314 1313 1312 1311 1310 1309 1308 1307 1306 1305 1304 1303 1302 1301 1300 1299 1298 1297 1296 1295 1294 1293 1292 1291 1290 1289 1288 1287 1286 1285 1284 1283 1282 1281 1280 1279 1278 1277 1276 1275 1274 1273 1272 1271 1270 1269 1268 1267 1266 1265 1264 1263 1262 1261 1260 1259 1258 1257 1256 1255 1254 1253 1252 1251 1250 1249 1248 1247 1246 1245 1244 1243 1242 1241 1240 1239 1238 1237 1236 1235 1234 1233 1232 1231 1230 1229 1228 1227 1226 1225 1224 1223 1222 1221 1220 1219 1218 1217 1216 1215 1214 1213 1212 1211 1210 1209 1208 1207 1206 1205 1204 1203 1202 1201 1200 1199 1198 1197 1196 1195 1194 1193 1192 1191 1190 1189 1188 1187 1186 1185 1184 1183 1182 1181 1



Рисунок 2 – Дерево якісного стану узагальненої сенсорної інфраструктури технічної системи

Висновок

Показники якості в наведених виразах визначають якісний стан складових сенсорної інфраструктури кіберфізичної системи, який згідно [11] можна віднести до проблемно-орієнтовних функціональних властивостей якості, які визначають наскільки добре система виконує свої функції.

Моніторинг стану відбувається у процесі затвердження в реальному часі як в умовах експлуатації, так і при тестуванні на стадіях виробництва (пусконаладжувальні роботи і дослідна експлуатація) та підтримки системи. Віднесення поточного стану датчиків сенсорної інфраструктури до певного піддіапазону шкали якості, виконує функцію редукції складності і дає значне зниження обсягу даних для оперування. Застосування «якісного» підходу, як універсального, тобто не пов'язаного з конкретним фізичним чи лінгвістичним значенням вимірюваної величини дає змогу оцінки впливу взаємозв'язків показників якості зовнішніх систем на поточний стан досліджуваної системи у процесі діагностування.

Список використаних джерел

1. Lee E. A. and Seshia S. A., Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach, <http://LeeSeshia.org>, 2011.
2. Colombo A. W., Karnouskos S. and Bangemann T., Towards the Next Generation of Industrial Cyber-Physical Systems, in Industrial Cloud-based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach, Springer, 2014.
3. Киселев М. И. «Индустрия 4.0»: некоторые проблемные вопросы / М. И. Киселев, С. В. Новиков // Станкоинструмент. – 2016. – Вип. № 2. – С. 42–46. – Режим доступу: www.stankoinstrument.su/journal/2016/2.
4. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (2014). «Recent Advances and Trends of Cyber-Physical Systems and Big Data Analytics in Industrial Informatics». IEEE Int. Conference on Industrial Informatics (INDIN) – 2014.
5. Волков С. Л. Теоретичні засади побудови моделі структури експертної системи якості кіберфізичних систем / Збірник наукових праць 6-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Метрологія, технічне регулювання,

якість: досягнення та перспективи» (Одеса, 11-12 жовтня). Одеса: ОДАТРЯ, 2016. – С. 139–141.

6. Волков С. Л. Модель сенсорно-апаратної інфраструктури кіберфізичної системи / Збірник наукових праць сьомої міжнародної науково-практичної конференції «Технічне регулювання, метрологія та інформаційні технології» (Одеса, 12-13 жовтня). Одеса: ОДАТРЯ, 2017. – С. 157–159.

7. Volkov S. Set-theoretic model of the information state of the industrial cyberphysical system / Scientific journal of the Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 2018. – № 1(89). – С. 132–138.

8. Волков С. Л., Волков К. С. Функція і шкала ентропійної оцінки якісного стану датчика / Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2018. – Вип. 1(12). – С. 10–15.

9. Volkov, S. Volkov K., Frazee-Frazenko O., Kazakova N. Prerequisites of entropy quality assessment function and scale use for technical systems qualitative condition definition / monograph published on the VIII International Conference of Students, PhD Students and Young Scientists "Engineer of XXI Century" materials, 7 december 2018, BielskoBiala, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej, 2018 : materiały konf. (Tom 1). – P. 377–384.

10. Волков С. Л., Кисельова О. І. Dual-v процесна модель якості штучного об'єкту / Метрологія та прилади (спецвипуск до 100 річчя П. П. Орнатського). – 2017. – № 6. – С. 62–65.

11. ДСТУ ISO/IEC 25010:2015 Інженерія програмних засобів і систем. Вимоги щодо якості та оцінювання систем і програмного продукту (SQuaRE). Моделі якості системи та програмних засобів (ISO/IEC 25010:2011, IDT).

References

1. Lee E. A. and Seshia S. A., Introduction to Embedded Systems — A Cyber-Physical Systems Approach, <http://LeeSeshia.org>, 2011.

2. Colombo A. W., Karnouskos S. and Bangemann T., Towards the Next Generation of Industrial Cyber-Physical Systems, in Industrial Cloud-based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach, Springer, 2014.

3. Kiselev M. I. «Industry 4.0»: some problematic issues [«Industriya 4.0»: nekotorye problemnye voprosy] / Stankoinstrument. 2016. № 2. – P. 42–46. – Mode of access: www.stankoinstrument.ru/journal/2016/2.

4. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (2014). «Recent Advances and Trends of Cyber-Physical Systems and Big Data Analytics in Indus-

trial Informatics». IEEE Int. Conference on Industrial Informatics (INDIN) 2014.

5. Volkov S. L. Theoretical principles of construction of the model of the structure of the expert system of quality of cyberphysical systems [Teoretychni zasady pobudovy modeli struktury ekspertnoyi systemy yakosti kiberfizychnykh system] / Collection of scientific papers of the 6th International Scientific and Practical Conference «Metrology, Technical Regulation, Quality: Achievements and Prospects» (Odesa, October 11-12). Odesa: OSATRQ, 2016. – P. 139–141.

6. Volkov S. L. Model of sensory-hardware infrastructure of the cyberphysical system [Model sensorno-aparatnoi infrastruktury kiberfizychnoi systemy] / Collection of scientific works of the seventh international scientific and practical conference «Technical regulation, metrology and information technologies» (Odesa, October 12-13). Odesa: OSATRQ, 2017. – P. 157–159.

7. Volkov S. Set-theoretic model of the information state of the industrial cyberphysical system / Scientific journal of the Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University. – 2018. – # 1(89). – P. 132–138.

8. Volkov S. L., Volkov K. S. The function and scale of the entropy assessment of the quality of the sensor [Funktsiya i shkala entropiynoyi otsinky yakisnoho stanu datchyka] / Collection of scientific works of the Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality. – 2018. – # 1(12). – P. 10–15.

9. Volkov, S. Volkov K., Frazee-Frazenko O., Kazakova N. Prerequisites of entropy quality assessment function and scale use for technical systems qualitative condition definition / monograph published on the VIII International Conference of Students, PhD Students and Young Scientists "Engineer of XXI Century" materials, 7 december 2018, BielskoBiala, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej, 2018 : materiały konf. (Tom 1). – P. 377–384.

10. Volkov S. L., Kiseleva O. I. Dual-v Process Model for the Quality of an Artificial Object [Dual-v protsesna model yakosti shtuchnoho ob'ektu] / Metrology and Instruments (special edition of the 100th anniversary of P. Ornatsky). – 2017. – # 6. – P. 62–65.

11. DSTU ISO / IEC 25010: 2015 Software engineering and systems engineering. System and Software Quality and Assessment Requirements (SQuaRE). System quality and software quality models (ISO / IEC 25010: 2011, IDT).

Надійшла до редакції 19.09.2018

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Арцибашева Н. М.	21	Ковра О. В.	21
Асабашвілі С. Д.	43	Коломієць Л. В.	14, 32
Бердиев Б. Ч.	21	Коломієць С. В.	43
Вавілов Є. В.	50	Лимаренко О. М.	14, 32
Волков С. Л.	6, 43, 50	Мащенко В. А.	27
Дащенко О. Ф.	14	Меленчук Т. М.	21
Казакова Н. Ф.	6	Оробей В. Ф.	14
Квасніков В. П.	27	Щербина Ю. В.	6

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

АРЦИБАШЕВА
Наталія Миколаївна

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, доцент кафедри транспортних технологій та менеджменту, кандидат технічних наук, доцент

АСАБАШВІЛІ
Суліко Дмитрович

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, науковий співробітник

БЕРДИЄВ
Берди Чарієвич

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, методист, викладач вищої категорії

БАВІЛОВ
Євген Віталійович

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук

ВОЛКОВ
Сергій Леонідович

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, докторант, кандидат технічних наук, доцент

ДАЩЕНКО
Олександр Федорович

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, професор кафедри «Динаміка, міцність машин та опір матеріалів» доктор технічних наук, професор

КАЗАКОВА
Надія Феліксівна

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, завідувач кафедри автоматизованих систем та кібербезпеки, доктор технічних наук, доцент

КВАСНІКОВ
Володимир Павлович

Національний авіаційний університет, м. Київ, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, доктор технічних наук, професор

КОВРА
Олександр Володимирович

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, ст. викладач кафедри автомобільного транспорту

КОЛОМІЄЦЬ
Леонід Володимирович

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, ректор, доктор технічних наук, професор

КОЛОМІЄЦЬ
Світлана Василівна

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, науковий співробітник

ЛИМАРЕНКО
Олександр Михайлович

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, доцент кафедри «Динаміка, міцність машин та опір матеріалів», кандидат технічних наук, доцент

МАЩЕНКО
Володимир Андрійович

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, докторант, кандидат фізико-математичних наук

МЕЛЕНЧУК
Тетяна Михайлівна

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, завідувач кафедри транспортних технологій та менеджменту, доктор технічних наук

ОРОБЕЙ
Віктор Федорович

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, завідувач кафедри «Динаміка, міцність машин та опір матеріалів», ОНПУ, доктор технічних наук, професор

ЩЕРБИНА
Юрій Володимирович

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса, доцент кафедри автоматизованих систем та кібербезпеки, кандидат технічних наук, доцент

Наукове видання

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ**

Випуск 2(13) 2018

Редактор

Братченко Г. Д.

Комп'ютерна верстка

Постоварова В. Д.

Адреса редакції: 65020, м. Одеса, вул. Ковальська 15, ОДАТРА,

Тел.: (048)728-07-11 – довідки;

E-mail: bratchenkohd@gmail.com

*Надруковано з готового оригінал макету
в видавництві – друкарні «ВМВ»*

*Підписано до друку 25.12.2018
Формат 60*88/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 6,8
Тираж 300 прим.
65053, м. Одеса, пр-т Добровольського 84-а.
www.vmv.odessa.ua*